



UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de ciências e tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS EM CLIMAS FRIOS

Dissertação apresentada para a obtenção do grau académico de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação de Edifícios pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia

Sandro Miguel dos Santos Botas

Orientador científico

Professor Doutor Vasco M. Rato

Lisboa, 2009

Agradecimentos (1)

Sempre! A palavra mais pesada do mundo que para mim é um orgulho carregar! A memória de que tudo o que é simples é mais bonito, é mais intenso. A recordação é tudo o que nos resta quando perdemos, é o fim do princípio de uma nova vida incorporada em mim.

Este trabalho simboliza um sonho conjunto, difícil de realizar em variadíssimos aspectos. A ti te agradeço por me teres dado oportunidade de tornar este sonho conjunto na realidade deste papel.

Agora e sempre, Obrigado PAI!

Agradecimentos (2)

Manifesto o meu agradecimento,

Ao professor Doutor Vasco M. Rato, orientador científico da dissertação pelo interesse, incentivo permanente, paciência, ajuda laboratorial, transmissão de conhecimentos e fundamentalmente pela motivação que incutiu em mim.

Ao professor Doutor Fernando M. A. Henriques, da secção de Materiais e tecnologias de construção do DEC-FCT/UNL, pela disponibilidade em ajudar qualquer que seja a situação. Sem essa ajuda teria sido impossível sequer a inscrição em mestrado.

Aos colegas Daniel Rodrigues, Tiago Pereira e Isabel Ferreira pela companhia e cooperação ao longo de todo o desenvolvimento experimental. Um agradecimento especial ao Tiago, companheiro de laboratório.

À minha família, Romana e Pedro pelo apoio e paciência ao longo da dissertação e de todo o curso.

À Sara pelo seu apoio e incentivo e paciência, vindos dela tem um sabor especial.

A todos os meus amigos e em especial ao Grupo de Danças e Cantares dos Redondos que tem sido a minha segunda família.

Resumo

As argamassas são materiais porosos usados em diversos tipos de aplicação em construções. O seu variado tipo de utilizações faz com que seja necessária uma boa compreensão do seu comportamento de modo a cumprir as exigências para as quais são definidas.

A partir do momento do aparecimento do cimento, as argamassas à base de cal caíram em desuso e o conhecimento de séculos de utilização foi-se perdendo. Torna-se necessário então retomar esse conhecimento de forma a ser usado não só na conservação e reabilitação mas também nas novas construções.

O objectivo desta dissertação foi avaliar o comportamento das argamassas em climas frios, mais concretamente aos ciclos gelo/degelo.

Foram preparadas vinte e quatro composições de argamassas fazendo variar o tipo de ligante (cal aérea; cal hidráulica e cal aérea + cimento), a granulometria da areia, a quantidade de água de amassadura e o uso de um introdutor de ar. Foram realizados ensaios de resistências mecânicas, porosidade e massa volúmica, absorção de água por capilaridade, secagem, difusão do vapor de água e resistência aos ciclos gelo/degelo de modo a avaliar o comportamento de argamassas em climas frios.

Através da análise de resultados efectuada foram tiradas algumas conclusões relevantes acerca da dimensão do agregado, quantidade de água de amassadura, uso do introdutor de ar e comportamento de argamassas com diferentes tipos de ligante. A porosidade depende maioritariamente da granulometria das areias e as resistências mecânicas do tipo de ligante usado. Estas duas características das argamassas têm uma grande influência na sua resistência aos ciclos gelo/degelo, e consequentemente em climas frios.

Palavras chave

Argamassa, cal, cimento, gelo/degelo, porosidade, resistência mecânica, introdutor de ar.

Abstract

Mortars are porous materials used in several types of applications in construction. The several types of uses makes it necessary to have a good understanding of their behaviour to fulfill the requirements that are defined in each case.

When the use of cement became generalized, the lime-based mortars fell into disuse and the knowledge of centuries of use has been lost. It is then necessary to resume this knowledge in order to be used not only in conservation and rehabilitation but also in new buildings.

The objective of this dissertation was to evaluate the behaviour of mortars in cold climates, more specifically to freeze / thaw cycles.

Twenty-four mortar compositions were prepared by varying the type of binder (air lime, hydraulic lime and air lime + cement), sand grain size, quantity of water mixing and the use of an air entrained agent. These mortars were tested for mechanical strength, porosity and density, water absorption by capillarity, drying, diffusion of water vapour and freeze/thaw cycles resistance in order to evaluate their performance in cold climates.

Through the analysis of the results some conclusions were drawn, namely about the aggregate size, quantity of water mixing, use of an air entrained agent and behaviour of mortars with different types of binders. The porosity depends mainly of the particle size of the sand and the mechanical strength depends on the type of binder used. These two characteristics of the mortars have a great influence on the resistance to freeze/thaw cycles, and consequently in cold climates.

Key-words

Mortar, lime, cement, freeze / thaw, porosity, mechanical resistance, air entrainment agent.

Índice

Índice de quadros	XII
Índice de figuras	XIII
Introdução	1
Enquadramento.....	1
Organização do texto.....	3
PARTE I – Estado Actual do Conhecimento	5
1.1 Argamassas	6
1.2 Descrição e caracterização dos materiais constituintes	7
1.2.1 Ligantes	7
1.2.1.1 Ligantes Hidráulicos.....	9
1.2.1.1.1 Cal Hidráulica.....	9
1.2.1.1.2 Cimento Portland.....	9
1.2.1.2 Ligantes Aéreos – Cal Aérea.....	10
1.2.2 Agregados	12
1.2.3 Água	12
1.2.4 Adjuvantes	13
1.3 Influência do agregado	14
1.3.1 Origem	14
1.3.2 Forma	14
1.3.3 Granulometria	15
1.4 Influência dos processos de execução da argamassa	16
1.4.1 Traço	16
1.4.2 Compactação	17
1.4.3 Cura	17
1.5 Porosidade das argamassas	17
1.5.1 Tipo de porosidade	18
1.5.2 Dimensão dos poros	18

1.5.3	Forma dos poros.....	19
1.6	Absorção de água por capilaridade.....	20
1.7	Difusão do vapor de água.....	21
1.8	Comportamento de argamassas em climas frios.....	22
1.8.1	Processo de congelação.....	22
1.8.1.1	Temperaturas/Volumes da água.....	22
1.8.1.2	Congelação da água.....	23
1.8.1.3	Tensão provocada pelo gelo.....	25
1.8.2	Ciclos gelo/degelo.....	26
1.8.2.1	Mecânica dos ciclos gelo/degelo.....	26
1.8.2.2	Magnitude da tensão causadora de danos.....	29
1.8.2.3	Tipos de danos.....	29
1.8.3	Melhoramento do comportamento de argamassas aos ciclo gelo/degelo....	30
1.8.3.1	Introdutor de ar.....	30
1.8.3.2	Previsão de danos.....	32
1.8.4	Ensaio unidireccional e omnidireccional.....	32
1.9	Comportamento de argamassas.....	33
1.9.1	Argamassas de cal aérea.....	33
1.9.2	Argamassas de cal hidráulica.....	36
1.9.3	Argamassas bastardas.....	40
PARTE II – Desenvolvimento Experimental.....		42
2	Descrição dos processos de ensaio.....	43
2.1	Materiais utilizados.....	43
2.1.1	Areias.....	43
2.1.2	Ligantes.....	44
2.1.3	Água.....	45
2.1.4	Introdutor de ar.....	45
2.2	Argamassas e sistema de identificação de provetes.....	45
2.2.1	Argamassas.....	45
2.2.2	Identificação dos provetes.....	47
2.3	Determinação da baridade dos materiais.....	48
2.4	Execução de argamassas.....	51

2.5	Argamassas frescas: consistência por espalhamento.....	53
2.6	Condições de cura.....	55
2.7	Argamassas endurecidas.....	56
2.7.1	Obtenção de provetes.....	56
2.7.2	Difusão do vapor de água.....	58
2.7.3	Absorção de água por capilaridade.....	60
2.7.4	Secagem.....	62
2.7.5	Módulo de elasticidade dinâmico.....	64
2.7.6	Resistência à tracção por flexão.....	66
2.7.7	Resistência à compressão.....	67
2.7.8	Porosidade aberta e massa volúmica aparente.....	68
2.7.9	Ciclos gelo/degelo.....	70
3	Apresentação e análise prévia de resultados.....	72
3.1	Baridade de ligantes e agregados.....	72
3.2	Consistência por espalhamento das argamassas.....	73
3.3	Porosidade aberta e massa volúmica.....	75
3.4	Resistência mecânicas.....	79
3.4.1	Resistência à tracção por flexão.....	80
3.4.2	Resistência à compressão.....	83
3.4.3	Módulo de elasticidade dinâmico.....	87
3.5	Difusão do vapor de água.....	90
3.6	Secagem de argamassas.....	95
3.7	Absorção de água por capilaridade.....	99
3.7.1	Evolução de absorção e valor assintótico.....	100
3.7.2	Coeficiente de absorção capilar.....	102
3.8	Ciclos gelo/degelo.....	105
3.8.1	Argamassas de cal aérea.....	106
3.8.2	Argamassas de cal hidráulica.....	108
3.8.3	Argamassas de cal aérea + cimento.....	111
3.8.4	Argamassas com introdutor de ar.....	113
3.9	Síntese.....	115
4	Análise relacional.....	120
4.1	Porosidade e resistência aos ciclos gelo/degelo.....	120

4.1.1	Argamassas de cal aérea.....	121
4.1.2	Argamassas de cal hidráulica.....	123
4.1.3	Argamassas de cal aérea + cimento.....	124
4.1.4	Argamassas com introdutor de ar.....	125
4.2	Resistências mecânicas e resistência aos ciclos gelo/degelo.....	128
4.2.1	Resistência à tracção por flexão.....	128
4.2.1.1	Argamassas de cal aérea.....	128
4.2.1.2	Argamassas de cal hidráulica.....	130
4.2.1.3	Argamassas de cal aérea + cimento.....	131
4.2.1.4	Argamassas com introdutor de ar.....	132
4.2.2	Resistência à compressão.....	134
4.2.2.1	Argamassas de cal aérea.....	134
4.2.2.2	Argamassas de cal hidráulica.....	135
4.2.2.3	Argamassas de cal aérea + cimento.....	136
4.2.2.4	Argamassas com introdutor de ar.....	137
5	Síntese global e validação de recomendações.....	139
	Conclusões gerais e sugestões de trabalhos futuros.....	142
	Conclusões gerais.....	142
	Sugestões de trabalhos futuros.....	145
	Bibliografia.....	147
	ANEXO I.....	154
	ANEXO II.....	158

Índice de quadros

Quadro 1.1 – Avaliação qualitativa do grau de alteração dos provetes de argamassa afectados por ciclos gelo/degelo.....	38
Quadro 1.2 – Percentagem de porosidade em relação ao volume total de argamassa...	40
Quadro 2.1 – Traço, consistência e constituição de argamassas.....	46
Quadro 2.2 – Volumes dos recipientes dos ensaios de baridade de areias e ligantes.....	51
Quadro 2.3 – Tempos de cura das argamassas.....	56
Quadro 3.1 – Baridade de ligantes e agregados.....	72
Quadro 3.2 – Intervalos admissíveis de espalhamento das argamassa.....	73
Quadro 3.3 – Quantidade de água e valores de espalhamento das argamassas.....	74
Quadro 3.4 – Porosidades e massas volúmicas aparentes das argamassas.....	76
Quadro 3.5 – Resistências à tracção por flexão das argamassas.....	80
Quadro 3.6 – Resistências à compressão das argamassas.....	83
Quadro 3.7 – Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos das argamassas.....	87
Quadro 3.8 – Coeficientes de difusão do vapor de água das argamassas.....	92
Quadro 3.9 – Índices de secagem das argamassas.....	96
Quadro 3.10 – Coeficientes de absorção de água por capilaridade (C. A.cap) e valores assintóticos de absorção (V. A.) das argamassas.....	100
Quadro A2.1 – coeficientes comparativos de degradação aos 10, 20 e 40 ciclos gelo/degelo.....	159

Índice de figuras

Figura 1.1 – Teores médios em argila.....	8
Figura 1.2 - Ciclo da cal.....	11
Figura 1.3 - Volume específico da água a diferentes temperaturas.....	23
Figura 1.4 - Geometria de congelação.....	24
Figura 1.5 - Durabilidade do betão em relação à temperatura mais baixa nos ciclos gelo degelo.....	27
Figura 1.6 – Esquema simplificado de dois ciclos gelo-degelo.....	28
Figura 1.7 – Vazio esférico no interior da argamassa formada pelo introdutor de ar.....	31
Figura 1.8 – Porosidade e resistência à compressão versus percentagem de cal numa argamassa de cal.....	34
Figura 1.9 – Evolução dos danos nos provetes depois de: a) 1 ciclo; b) 2 ciclos; c) 3 ciclos.....	36
Figura 1.10 – Resistência à compressão de argamassas versus tempo de cura.....	37
Figura 1.11 - Evolução dos danos nos provetes depois de: a) 1 ciclo; b) 3 ciclos; c)11 ciclos.....	39
Figura 1.12 - Relação entre resistência mecânica, difusibilidade do vapor de água e porosidade.....	41
Figura 2.1 - Curvas granulométricas das areias usadas no desenvolvimento experimental.....	44
Figura 2.2 - Recipientes para determinação da baridade de areias e ligantes, respectivamente.....	48
Figura 2.3 – Ensaio de baridade: a) areias; b) ligantes.....	49
Figura 2.4 – Moldes usados.....	52
Figura 2.5 – Compactador mecânico.....	53
Figura 2.6 – a) régua e craveira usadas na medição do espalhamento, varão metálico e colher de pedreiro; b) mesa de consistência por espalhamento e molde tronco-cónico...54	
Figura 2.7 – Provetes na sala climatizada.....	55
Figura 2.8 – Obtenção dos provetes.....	57
Figura 2.9 – a) Esquema de condicionamento do provete na cápsula; b) Provetes preparados nas cápsulas.....	58

Figura 2.10 – a) Esquema de montagem do ensaio de absorção de água por capilaridade (vista em corte); b) Disposição dos provetes no ensaio de absorção de água por capilaridade.....	61
Figura 2.11 – a) Esquema de montagem do ensaio de secagem (vista em corte); b) Vista do ensaio de secagem.....	63
Figura 2.12 - Equipamento de medição do módulo de elasticidade dinâmico.....	64
Figura 2.13 – Posições adoptadas nas medições do módulo de elasticidade dinâmico.....	65
Figura 2.14 – a) Ensaio de resistência à tracção por flexão.....	66
Figura 2.15 - Ensaio de resistência à compressão.....	67
Figura 2.16 - a) Ensaio de determinação da porosidade e massa volúmica aparente; b) Balança usada na pesagem dos provetes.....	69
Figura 2.17 – Variação da temperatura com o tempo em um ciclo.....	70
Figura 2.18 - a) câmara climática simuladora dos ciclos gelo degelo; b) saco de plástico com duplo fecho hermético.....	71
Figura 3.1 – Resultados do ensaio de consistência por espalhamento em argamassas com e sem introdutor de ar.....	75
Figura 3.2 – Porosidades das argamassas.....	77
Figura 3.3 – Comparação dos valores de porosidade de argamassas com e sem introdutor de ar.....	79
Figura 3.4 – Resistência à tracção por flexão das argamassas.....	81
Figura 3.5 – Comparação dos valores de resistência à tracção por flexão de argamassas com e sem introdutor de ar.....	83
Figura 3.6 – Resistência à compressão das argamassas.....	84
Figura 3.7 – Comparação dos valores de resistência à compressão de argamassas com e sem introdutor de ar.....	86
Figura 3.8 – Módulos de elasticidade dinâmicos das argamassas.....	88
Figura 3.9 – Comparação dos valores de módulo de elasticidade dinâmico de argamassas com e sem introdutor de ar.....	89
Figura 3.10 – Anomalias em provetes derivadas ao silicone.....	91
Figura 3.11 – Valores do coeficiente de difusão do vapor de água das argamassas.....	93
Figura 3.12 – Comparação dos valores dos coeficiente de difusão de vapor de água de argamassas com e sem introdutor de ar.....	94
Figura 3.13 – Valores dos índices de secagem das argamassas.....	97

Figura 3.14 – Comparação dos valores do índice de secagem das argamassas com e sem introdutor de ar.....	98
Figura 3.15 – Evolução da absorção de água por capilaridade das argamassas em função do tempo.....	101
Figura 3.16 – Valores dos coeficientes de absorção capilar das argamassas.....	103
Figura 3.17 – Comparação dos valores do coeficiente de absorção capilar das argamassas com e sem introdutor de ar.....	104
Figura 3.18 – Massa perdida ao longo dos ciclos gelo/degelo em argamassas de cal aérea.....	106
Figura 3.19 – Evolução visual de um provete de cal aérea com areia FPS 120 e maior quantidade de água.....	107
Figura 3.20 – Evolução visual de um provete de cal aérea com areia de rio e menor quantidade de água.....	107
Figura 3.21 – Massa perdida ao longo dos ciclos gelo/degelo em argamassas de cal hidráulica.....	108
Figura 3.22 – Queda da “placa” da superfície de um provete de cal hidráulica com areia FPS 120.....	109
Figura 3.23 – Evolução visual de um provete de cal hidráulica com areia AGS 1/2 e maior quantidade de água.....	110
Figura 3.24 – Evolução visual de um provete de cal hidráulica com areia de rio e menor quantidade de água.....	110
Figura 3.25 – Massa perdida ao longo dos ciclos gelo/degelo em argamassas de cal aérea + cimento.....	111
Figura 3.26 – Evolução visual de um provete de cal aérea + cimento com areia de rio e menor quantidade de água.....	112
Figura 3.27 – Evolução visual de um provete de cal aérea + cimento com areia AGS 1/2 e menor quantidade de água.....	112
Figura 3.28 – Índices de degradação das argamassas com areia de rio com e sem introdutor de ar.....	113
Figura 3.29 – Evolução visual de um provete de cal aérea com areia de rio e menor quantidade de água com introdutor de ar.....	114
Figura 3.30 – Evolução visual de um provete de cal hidráulica com areia de rio e menor quantidade de água com introdutor de ar.....	114
Figura 3.31 – Evolução visual de um provete de cal aérea + cimento com areia de rio e menor quantidade de água com introdutor de ar.....	115
Figura 4.1 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea.....	121

Figura 4.2 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica.....	123
Figura 4.3 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento.....	124
Figura 4.4 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea com e sem introdutor de ar.....	125
Figura 4.5 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica com e sem introdutor de ar.....	126
Figura 4.6 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento com e sem introdutor de ar.....	126
Figura 4.7 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea.....	128
Figura 4.8 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica.....	130
Figura 4.9 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento.....	131
Figura 4.10 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea com e sem introdutor de ar.....	132
Figura 4.11 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica com e sem introdutor de ar.....	132
Figura 4.12 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento com e sem introdutor de ar.....	133
Figura 4.13 – Relação entre a resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea.....	134
Figura 4.14 – Relação entre a Resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica.....	135
Figura 4.15 – Relação entre a resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento.....	136
Figura 4.16 – Relação entre a resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea com e sem introdutor de ar.....	137
Figura 4.17 – Relação entre a resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica com e sem introdutor de ar.....	137
Figura 4.18 – Relação entre a resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento com e sem introdutor de ar.....	138

Introdução

Enquadramento

As argamassas são materiais porosos usados em diversos tipos de aplicação em construções. O seu variado espectro de utilizações faz com que seja necessária uma boa compreensão do seu comportamento de modo a cumprir as exigências para as quais foi definida. As argamassas têm associado ao seu nome o tipo de ligante com o qual são efectuadas, sendo este o componente que maioritariamente influencia o seu comportamento.

As argamassas à base de cal foram, ao longo de muitos séculos, utilizadas na construção de monumentos. A cal aérea era a mais utilizada, e as características finais das argamassas eram fortemente dependentes das civilizações que as usavam. Como consequência desta situação, hoje em dia é encontrada uma larga variedade de argamassas nos edifícios históricos.

O aparecimento do cimento como ligante levou ao seu uso repentino e excessivo na maioria das vertentes da construção incluindo a conservação e a reabilitação. O seu rápido endurecimento e o factor de apresentar grandes resistências mecânicas foram os factores determinantes para este uso excessivo.

A partir do momento do aparecimento do cimento, as argamassas à base de cal caíram em desuso e o conhecimento de séculos de utilização foi-se perdendo. Há algumas décadas, foi notado que a substituição total da cal pelo cimento em argamassas usadas na conservação e reabilitação se constituiu como um erro grave. As argamassas de cimento apresentam incompatibilidades químicas e mecânicas em relação aos suportes antigos, têm uma elevada rigidez, o seu processo de endurecimento dá origem à libertação de sais solúveis e apresentam ainda uma menor vida útil em relação às argamassas de cal. Foi então necessário um novo emprego da cal e uma nova pesquisa de modo a otimizar o comportamento de argamassas com este ligante.

As exigências funcionais de uma argamassa levam a uma tentativa de definição da melhor formulação tendo em conta variados aspectos desde os componentes até ao seu

custo. Identificam-se quatro factores de variação relativamente ao comportamento de argamassas:

- Características dos componentes utilizados: tipo de ligante, granulometria da areia e uso de adições e adjuvantes;
- Traço e quantidade de água na amassadura;
- O processo de cura;
- Os procedimentos de aplicação e características do suporte.

De acordo com uma análise feita à investigação publicada, estes factores não estão desenvolvidos com o mesmo grau de profundidade. O conhecimento da influência dos traços e do ligante cimento é o mais desenvolvido. O tipo de areia e a influência do ligante cal estão ainda um pouco aquém em relação aos anteriores. O processo de cura em obra é dificilmente parametrizável pois, em obra, torna-se impossível controlar a maioria das condições ambientais. Os processos de aplicação são também muito subjectivos na medida em que dependem do operador.

O factor durabilidade é muito importante nas argamassas para construção. Uma argamassa tem maior durabilidade consoante resiste melhor à acção dos agentes de degradação que actuam sobre ela. Esses agentes podem ser os mais variados consoante as características da região e do clima onde é feita a construção. Climas áridos, soalheiros e frios são favoráveis a que existam, respectivamente, os agentes de degradação como o vento, o sol e os ciclos gelo/degelo.

A água, um dos principais agentes agressores para as argamassas, exponencia o efeito dos ciclos gelo/degelo em climas frios. Os ciclos gelo-degelo são um processo pelo qual a água no interior da argamassa cristaliza e liquidifica sucessivamente.

A durabilidade de uma argamassa aos ciclos gelo-degelo está dependente da sua capacidade para:

- Resistir à penetração de água;
- Perder água rapidamente para prevenir a saturação;
- Ter uma estrutura porosa que permita resistir à tensão provocada pelo aumento de volume da água quando passa ao estado sólido.

Com base nos pressupostos anteriores, foi julgado oportuno o desenvolvimento de um trabalho de investigação de forma a avaliar o comportamento de argamassas à acção dos ciclos gelo/degelo fazendo variar a granulometria da areia, tipo de ligante (s), quantidade de água e uso de um adjuvante introdutor de ar. Este foi o objectivo estabelecido. As hipóteses que estão associadas a este objectivo são: (i) a variação do tipo de ligante gera resistências mecânicas de diferentes ordens de grandeza e tem implicações na resistência aos ciclos gelo/degelo; (ii) a variação da dimensão das partículas do agregado, a quantidade de água de amassadura e o uso de um introdutor de ar modificam a microestrutura do material endurecido o que gera diferenças no comportamento aos ciclos gelo/degelo.

Os parâmetros de variação considerados neste trabalho são pois o tipo de ligante, a granulometria do agregado, a quantidade de água de amassadura e o recurso a um adjuvante introdutor de ar. O desenvolvimento do objectivo proposto depende da análise a 24 composições de argamassas a que correspondem três areias de granulometrias diferentes, três ligantes (cal aérea, cal hidráulica e um ligante misto composto com cal aérea + cimento), duas quantidades diferentes de água na amassadura e o uso de um introdutor de ar.

Organização do texto

O texto está organizado numa introdução, duas partes – estado actual do conhecimento e desenvolvimento experimental e nas conclusões.

A primeira parte destina-se a sintetizar o estado actual do conhecimento. São descritos e caracterizados todos os constituintes usados, bem como as características e propriedades das argamassas de constituição semelhante às formuladas na fase experimental. Posteriormente, é abordado o comportamento de argamassas em climas frios, nomeadamente, a resistência aos ciclos gelo/degelo e todos os factores determinantes nesta propriedade. Por fim é abordada a interligação de propriedades dos diversos tipos de argamassas posteriormente executadas no desenvolvimento experimental.

A segunda parte inclui quatro capítulos nos quais se descreve o trabalho experimental realizado. O capítulo 2 aborda a descrição dos procedimentos de ensaio adoptados na caracterização dos componentes, no fabrico das argamassas e na caracterização das

argamassas endurecidas. O capítulo 3 descreve a análise prévia de resultados de todos os ensaios. O capítulo 4 faz a análise relacional das características das argamassas com o comportamento aos ciclos gelo/degelo. No capítulo 5 é feita uma análise global que interliga características e propriedades das argamassas com o objectivo de elaborar recomendações acerca da composição de argamassas que melhor se adequam para a reabilitação e a conservação de edifícios em climas frios.

Por fim, são elaboradas as conclusões do trabalho e apresentadas sugestões de trabalhos futuros.

Parte I – Estado actual do conhecimento

1.1 Argamassas

Uma argamassa é um material resultante de uma mistura de agregados (finos), um ou mais ligantes, água e, eventualmente, adjuvantes com a finalidade de melhorar as suas propriedades. As argamassas têm como objectivo cumprir as funções para as quais forem criadas, nomeadamente as mais comuns como o assentamento de alvenarias e o revestimento de elementos (paredes, colunas, fachadas, ...).

Existem vários tipos de classificação das argamassas, segundo a sua dosagem, consistência, produção e principalmente segundo a natureza do (s) ligante (s), pois são estes que maioritariamente vão influenciar o seu comportamento. Geralmente, as argamassas são divididas em três grupos:

- Argamassas de cal;
- Argamassas de cimento;
- Argamassas bastardas;

As argamassas de cal podem ainda ser sub-divididas em dois grupos¹:

- Argamassas de cal aérea. São constituídas fundamentalmente por hidróxido de cálcio.
- Argamassas de cal hidráulica. São constituídas predominantemente por silicatos de cálcio, aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio.

A principal diferença entre a cal aérea e a cal hidráulica está nos compostos que, por sua vez, dão naturalmente origem a reacções distintas com a água e, por esta via, a propriedades físicas, químicas e mecânicas do material endurecido também distintas.

As principais características e propriedades das argamassas de cal aérea são: boa capacidade de deformação, baixa resistência mecânica, alta absorção capilar, alta permeabilidade ao vapor de água e baixa resistência aos ciclos gelo/degelo.[63]

¹ Os constituintes que se seguem são do ligante e não da argamassa porque esta ainda tem os outros compostos já referidos.

Nas argamassas à base de cimento, recorrendo a uma explicação simplificada, na presença de água os silicatos e os aluminatos do cimento hidratam e formam uma pasta de cimento² (chama-se pasta pois não tem agregados). As principais características de uma argamassa de cimento são: elevada resistência mecânica, baixa absorção capilar, baixa permeabilidade ao vapor de água e alta resistência aos ciclos gelo/degelo.

Nas argamassas bastardas os ligantes são uma mistura de um aéreo e um hidráulico. Geralmente têm características intermédias entre as argamassas de um tipo de ligante apenas, aproveitando as boas mas também as más³ características de cada um. As argamassas de cimento e cal aérea são as mais usadas e apresentam características intermédias entre as argamassas de cimento e as argamassas de cal aérea.

1.2 Descrição e caracterização dos materiais constituintes

1.2.1 Ligantes

Um ligante é um produto com a propriedade de aglomerar uma proporção elevada de materiais agregados, como areia, conferindo ao conjunto (argamassa) coesão e resistência.

A classificação dos ligantes é feita de diferentes formas por vários autores. Coutinho [15-vol. 1] divide-os em três categorias: hidráulicos, aéreos e orgânicos. Quanto à sua origem podemos classificá-los como orgânicos, minerais ou sintéticos. Por último, Joana Coutinho [17] baseia a sua classificação de acordo com a afinidade com a água, dividindo os ligantes em hidrófilos e hidrófobos.

Neste contexto interessa abordar os ligantes hidrófilos de origem mineral, já que são estes os usados ao longo de todo o trabalho de investigação.

Os ligantes hidrófilos de origem mineral são ligantes constituídos genericamente por pós finos. Ao serem misturados com água, formam uma pasta com capacidade de aglutinar partículas que faz presa e endurece [56]. A categoria de ligantes hidrófilos

² O processo de hidratação do cimento e suas características, bem como as características dos outros ligantes cal aérea e cal hidráulica encontram-se pormenorizados no capítulo “ligantes”.

³ Entenda-se boas ou más características as que, para o devido efeito, cumprem ou não os requisitos que determinada argamassa, em determinada aplicação, deve respeitar.

divide-se em dois grupos: aéreos e hidráulicos. Dentro dos aéreos abordar-se-á a cal aérea, e dentro dos hidráulicos a cal hidráulica e o cimento Portland.

Os compostos comuns dos ligantes minerais são o calcário e a argila. Alguns destes ligantes podem ser obtidos natural ou artificialmente. Os ligantes são classificados como naturais quando a sua obtenção é feita através de pedras calcárias com determinado teor em argila, sendo que, até chegar ao produto final, não é adicionado qualquer composto. São classificados como artificiais quando resultam da mistura de vários materiais, podendo a argila e o calcário ser provenientes de locais distintos; neste caso, a mistura não ocorre na natureza.

O teor em argila associado à rocha calcária é o factor que permite distinguir os vários tipos de ligantes naturais. Os teores médios em argila dos ligantes reflectem-se na figura 1.1.

Como ligante artificial temos o cimento Portland que é obtido através de uma mistura proporcionada de calcário, argila, e eventualmente outras substâncias apropriadas.

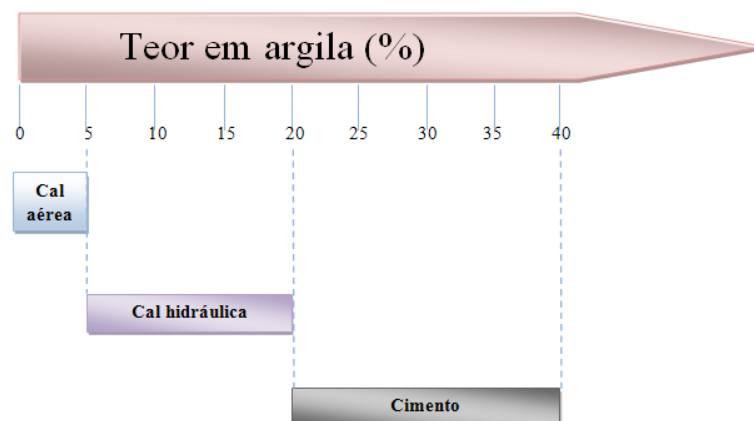


Figura 1.1 – Teores médios em argila

1.2.1.1 Ligantes Hidráulicos

1.2.1.1.1 Cal Hidráulica

A matéria-prima da cal hidráulica é rocha calcária com teores de argila entre 5 a 20%, frequentemente designados por calcários margosos. Este tipo de rocha, quando tratado termicamente a cerca de 1200-1500 °C dá origem a cal hidráulica, que é um produto que endurece tanto na água como no ar.

A cal hidráulica é constituída por silicatos (SiO_2 , 2CaO) e aluminatos de cálcio (Al_2O_3 , CaO) que, hidratando-se, endurecem na água ou ao ar e também por hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) – no mínimo 3%, que continua livre e vai endurecer por carbonatação [40,54].

O processo de cozedura do calcário margoso é constituído pelas seguintes fases:

- 500-700°C – desidratação da argila;
- 850-900°C – decomposição do calcário;
- 1200-1500°C – reacção da sílica e da alumina da argila com o óxido de cálcio, originando silicatos e aluminatos de cálcio.

Depois da saída do forno obtêm-se pedaços de várias dimensões constituídos pela mistura de silicatos e aluminatos de cálcio, cal livre e ainda um pó inerte formado pela pulverização durante o arrefecimento que é o silicato bicálcico [17]. A cal retirada do forno deve ser extinta de modo a eliminar a cal viva e provocar a pulverização de toda a cal hidráulica. Depois de extinta retiram-se os grãos incozidos. Os grãos cozidos são moídos e juntos ao restante pó, mistura que assume então a designação de cal hidráulica [15,54].

1.2.1.1.2 Cimento Portland

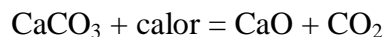
Segundo a norma [NP 2064 – 1991] : “o cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico, finalmente moído, que, convenientemente amassado com água, forma uma pasta que, devido a reacções de hidratação, faz presa, endurece e permanece mecanicamente resistente e estável, tanto ao ar como na água, em condições normais de aplicação”.

O cimento Portland é obtido a partir de uma mistura devidamente proporcionada de calcário (carbonato de cálcio), argila ou xisto argiloso e, eventualmente, outras substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro. A mistura reduzida a pó muito fino e muito bem homogeneizada e dispersa (geralmente a seco), é cozida a uma temperatura na ordem dos 1450 °C em grandes fornos rotativos. A estas temperaturas, as matérias reagem entre si, no que são ajudadas pela fase líquida obtida pela fusão de cerca de 20% da matéria-prima originando novos compostos (clínquerização). Na consequência destes fenómenos químicos e físicos, os produtos da reacção, ao arrefecerem, aglomeram-se em pedaços com dimensões variáveis chamados clínquer. O clínquer é composto por silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico e aluminoferrato tetracálcico [15-vol. 1,17]. Os duros nódulos de clínquer são posteriormente arrefecidos e moídos simultaneamente com uma pequena percentagem de gesso (regulador de presa) até se obter uma granulometria muito fina.

1.2.1.2 Ligantes Aéreos – Cal Aérea

A cal aérea é o ligante que resulta da cozedura de pedra calcária quase pura, ou seja, de um calcário com uma percentagem em carbonato de cálcio (CaCO_3) igual ou superior a 95%. A restante composição do ligante é argila e outras impurezas. As várias etapas para que, da pedra calcária, se obtenha o produto final cal aérea serão referidas seguidamente [55,78].

A cozedura do calcário a cerca de 900 °C dá origem à cal viva que é sobretudo óxido de cálcio (CaO):



Segue-se o processo de extinção. A cal viva, em presença de água, transforma-se em cal “apagada” que é sobretudo hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), dando-se um grande aumento de volume:



Obtém-se, assim, cal aérea utilizada em construção, em pó ou em pasta, dependendo do seu tipo de extinção.

Depois de aplicada a argamassa de cal aérea dá-se o processo de carbonatação:



O processo de carbonatação dá-se com a reacção entre o hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono. É de realçar que as argamassas de cal aérea endurecem exclusivamente em contacto com o ar, pois apenas deste modo o dióxido de carbono entra em contacto com o hidróxido de cálcio, permitindo a reconversão em carbonato de cálcio. A carbonatação é um processo muito lento, sendo necessário, nalguns casos, muitos anos para ficar completa [19,53].

Seguidamente é mostrado um esquema resumo para uma visualização mais expedita do ciclo da cal.

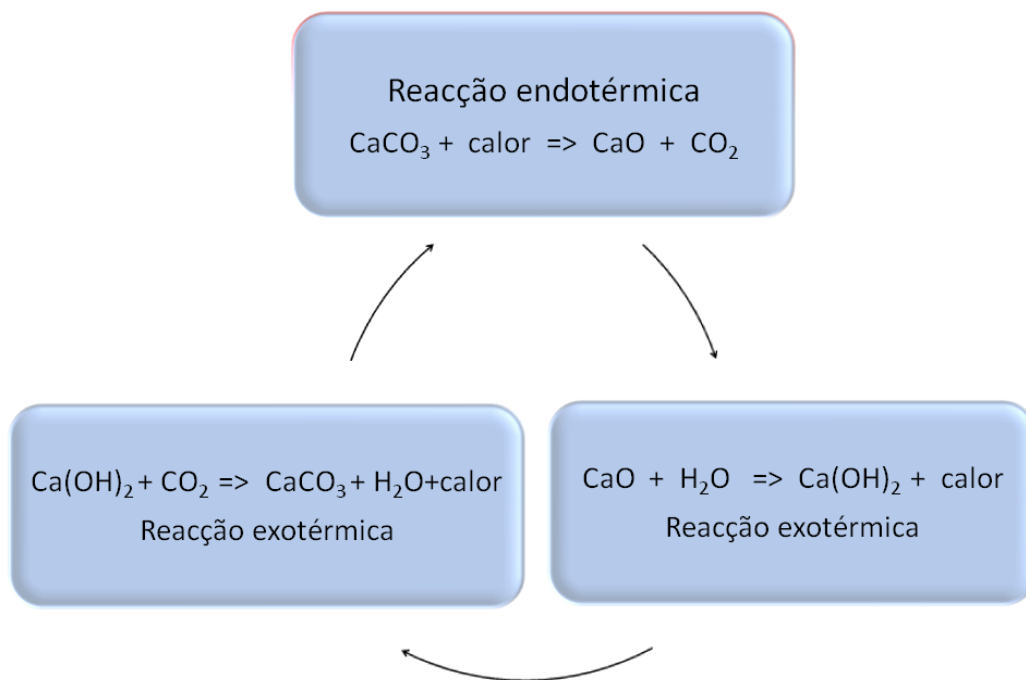


Figura 1.2 - Ciclo da cal

1.2.2 Agregados

De todos os materiais que constituem uma argamassa, os agregados representam geralmente a componente maioritária. O agregado mais usado no fabrico de argamassas é a areia⁴.

A areia influencia de forma muito significativa as características da argamassa. Deste modo, a variação do tipo de areia constitui uma das formas mais eficazes de provocar variações estruturais em diferentes argamassas cujo comportamento tenha como objectivo ser avaliado e comparado. A areia funciona como o “esqueleto” da argamassa que ganha coesão pela ligação dos seus grãos ao ligante, pelo que a qualidade do agregado é fundamental na argamassa conferindo-lhe estabilidade volumétrica, durabilidade e bom desempenho estrutural [69,75].

Usualmente, os agregados são agrupados conforme o ponto de vista considerado: petrográfico, massa volúmica, baridade, modo de obtenção e dimensão das partículas⁵ [15-vol. 1].

1.2.3 Água

A presença de água na produção de argamassas com ligantes aéreos e hidráulicos é indispensável para criar plasticidade no estado fresco e garantir capacidade aglutinante, assim como na hidratação dos ligantes hidráulicos (silicatos e aluminatos) [17].

A quantidade de água utilizada é um factor determinante para a qualidade da argamassa, pois vai ser decisiva na sua consistência no estado fresco, na aderência ao suporte e no processo de endurecimento. Deste modo, será também um factor condicionante das propriedades da estrutura interna da argamassa e, por esta via, das características do seu comportamento. Deve destacar-se, no que diz respeito às propriedades, a porosidade e porometria; quanto ao comportamento, merecem relevo as resistências mecânicas, a absorção de água e a resistência aos sais solúveis. A presença de água deve ser em quantidade mínima para garantir as funções acima referidas uma vez que, em excesso, dá origem a propriedades e características indesejadas. Há que garantir a consistência

⁴ Este é o agregado que foi usado na parte experimental do trabalho.

⁵ Estes assuntos estão desenvolvidos no capítulo “influência do agregado”.

necessária a uma boa trabalhabilidade sem que seja comprometido o comportamento geral face às exigências de cada caso. Seabra *et al* [72] referem a extrema importância do rácio água/ligante no comportamento do estado fresco das argamassas; Schutter e Poppe [66] referem, inclusivamente que, tradicionalmente, o rácio água/ligante é o parâmetro mais importante nas futuras características da argamassa. Yang *et al* [81] atribuem à água a principal responsabilidade nos processos de fissuras por retracção e pelos mecanismos do gelo/degelo.

Em condições correntes, a água da rede pública é adequada para o fabrico de argamassas.

2.2.4 Adjuvantes

É chamado adjuvante à substância utilizada em percentagem inferior a 5% da massa de ligante adicionada durante a amassadura aos demais componentes das argamassas com o fim de modificar e melhorar certas propriedades, quer no estado fluido, quer no estado sólido, ou ainda na passagem de um estado a outro [15-vol. 1].

A utilização de adjuvantes é já muito antiga, sendo que os usados actualmente nada têm a ver com os que foram utilizados na era Romana com o intuito de melhorar a trabalhabilidade (sangue, leite e banha que é hoje conhecido, introduzem ar nas argamassas sob a forma de bolhas).

O conhecimento do comportamento deste tipo de componentes está bem estudado no fabrico de betão, visto que o seu desenvolvimento se deu a par do desenvolvimento do cimento Portland, sendo que, nas argamassas os efeitos ainda não estão devidamente testados e reportados [15-vol. 1,57].

Os adjuvantes que maioritariamente são usados nas argamassas são: introdutores de ar, aceleradores de presa e plastificantes.

1.3 Influência do agregado

Existe uma série de atributos nos agregados que têm muita influência nas características e no comportamento das argamassas. A abordagem que é feita inclui três factores que maioritariamente influenciam estes aspectos: origem, forma e granulometria.

1.3.1 Origem

A origem do agregado exerce maior importância nas características mecânicas da argamassa [77]. No caso Português podem admitir-se três origens que correspondem à maioria das areias usadas em argamassas: areia de rio, areia de areeiro e areia manufacturada a partir de rocha (mais rara). Lanas *et al* [54] nos seus ensaios com argamassas de cal hidráulica, concluiu que as argamassas com areias com grandes quantidades de calcário têm resistências mecânicas mais elevadas quando comparadas com as que incorporam areias com maiores quantidades de quartzo e sílica (areia de rio). Este facto pode explicar-se com a similaridade da composição entre o agregado e o ligante, fazendo com que a interface ligante-agregado fique mais forte.

A diferença da origem também se faz sentir na trabalhabilidade da argamassa fresca. Na maioria dos casos, a areia de areeiro tem na sua composição uma maior quantidade de materiais argilosos e impurezas o que leva a que, para obter uma trabalhabilidade equivalente, se use uma maior quantidade de água em relação à areia de rio. Esta maior quantidade de água leva a que na fase de endurecimento a argamassa possa vir a ter uma grande fissuração.

1.3.2 Forma

A forma das partículas de areia tem muita influência sobre algumas características das argamassas [20,54]. O uso de areias com grãos de forma arredondada origina uma microestrutura com poros de maiores dimensões. A ligação ligante-agregado fica mais fraca, o que causa resistências mecânicas menores na argamassa endurecida. Em sentido contrário, estão as areias com grãos angulares que, por originarem poros de menores dimensões, aumentam a resistência mecânica da argamassa [54]. Toomey e Pavía [77]

confirmam as afirmações anteriores e acrescentam que areias de forma arredondada produzem argamassas com maior porosidade e maior absorção de água por capilaridade. A trabalhabilidade das argamassas frescas também é afectada pela forma dos grãos de areia. Quanto mais arredondados forem os grãos, melhor trabalhabilidade provocam na argamassa em estado fresco.

No que diz respeito à resistência das argamassas aos ciclos gelo/degelo, Maurenbrecher *et al* [59], nos seus estudos com cais hidráulicas, concluíram que uma boa angulosidade das areias melhora a performance das argamassas nesse factor.

1.3.3 Granulometria

A granulometria⁶, segundo todos os autores, é a característica que mais influencia as argamassas. Se a granulometria for contínua⁷, e se as partículas tiverem uma forma adequada, obtém-se uma argamassa muito compacta e resistente para uma dosagem mínima de ligante, reduzindo paralelamente o risco de segregação⁸ [16,77].

Geralmente, é a superfície específica⁹ da areia que determina a quantidade de água necessária para molhar e lubrificar a mistura. Como é do conhecimento geral, quanto menor a dimensão das partículas maior a superfície específica.

O uso de uma areia grossa, com máxima dimensão maior, reduz a resistência mecânica das argamassas. Este aspecto é devido ao facto de os grãos de menor dimensão formarem uma ligação areia-ligante muito mais resistente, embora tenham uma superfície de aderência menor relativamente aos grãos mais grossos; por outro lado, com areias muito grossas, pode aumentar a resistência mecânica porque a própria resistência das partículas de areia assume um significado mais relevante [16, 54, 68].

Lanas *et al* [54], no seu estudo com argamassas de cal hidráulica, confirmam que uma adequada granulometria origina na argamassa melhores resistências mecânicas, nomeadamente melhores resistências à flexão e à compressão. Balen e Gemert, citados por Reddy e Gupta [69], afirmam que, para uma dada consistência, argamassas com

⁶ Granulometria: distribuição das partículas de um dado agregado segundo as suas dimensões.

⁷ Granulometria contínua: partículas distribuídas uniformemente por todas as fracções granulométricas.

⁸ Segregação: a segregação consiste na separação dos constituintes da argamassa.

⁹ Superfície específica: somatório da área de superfície do material por unidade de massa ou de volume.

areias muito finas necessitam mais de 50% de água do que argamassas similares com areias de granulometria normal. Reddy e Gupta [69] concluíram que o facto de as argamassas com maior quantidade de finos necessitarem de uma maior quantidade de água faz com que estas apresentem uma maior quantidade de fissuras por retracção na fase de endurecimento. Maurenbrecher *et al* [59] afirmam que areias com partículas mais grossas melhoram a resistência das argamassas aos ciclos gelo-degelo.

1.4 Influência dos processos de execução da argamassa

Neste sub-capítulo, é apresentada a influência, nas argamassas, dos processos de execução mais relevantes no contexto deste trabalho. O traço, a compactação e a cura entre argamassas com o(s) mesmo(s) ligante(s) não foram alterados no âmbito da parte experimental deste trabalho. Para uma melhor perspectiva geral, são apresentados alguns factores que são influenciados por estes processos.

1.4.1 Traço

Tão importante como a influência de cada um dos constituintes da argamassa é a relação com que estes são doseados. A relação entre a quantidade de ligante e a de agregado designa-se por traço e é expressa geralmente como a razão entre a quantidade de ligante e a quantidade de agregado. Esta razão pode ser expressa em relação ao volume ou à massa.

O traço tem influência maioritária nas características de resistência mecânica e porosidade das argamassas.

A resistência mecânica da argamassa aumenta com o aumento do traço para qualquer um dos três ligantes. A influência na porosidade não é semelhante em cada um dos ligantes. No caso das argamassas de cimento, quanto maior for o traço menor será o valor da porosidade. Nas argamassas de cal aérea e hidráulica verifica-se a tendência contrária, quanto maior a quantidade de cal, maior será a porosidade da argamassa [64, 53,54,37].

1.4.2 Compactação

A compactação é o processo seguinte à colocação da argamassa nos moldes. Não é um processo obrigatório e não está mencionado na norma europeia de execução de argamassas EN 1015-2:1998 [47]. O objectivo da compactação é facilitar o arranjo interno das partículas do agregado, provocando a saída de grande parte do volume de ar ali existente, obtendo-se uma argamassa mais compacta [15-vol. 2]. Ao fazer com que este ar seja expulso, a argamassa irá ter menor porosidade e, como já referido, uma menor porosidade conduz a maiores resistências mecânicas. Estudos realizados com o intuito de comparar diferentes níveis de compactação mostram que não só as resistências mecânicas são afectadas, como também a absorção de água por capilaridade que, com melhor compactação, assume valores menores e é mais lenta [15-vol. 2,75].

1.4.3 Cura

Vários aspectos, de que se pode destacar o tipo de ligante, têm influência na cura das argamassas¹⁰. Nas argamassas de cal aérea o acesso ao dióxido de carbono é o factor mais importante devido ao facto destas argamassas endurecerem por carbonatação do hidróxido de cálcio. Nas argamassas de ligantes hidráulicos, a cura está relacionada com a duração da disponibilidade de água para o processo de endurecimento, pois este ocorre por hidratação. As argamassas bastardas têm um comportamento intermédio, necessitando assim do agrupar dos factores anteriores para uma boa cura [78,68,52].

1.5 Porosidade das argamassas

A porosidade é definida como a quantidade de ar existente no interior de uma argamassa endurecida. Este volume de ar pode resultar da natureza dos constituintes da argamassa, dos processos usados na sua execução ou da forma de aplicação.

A porosidade é, senão o factor mais importante, um dos mais importantes no comportamento de uma argamassa. De uma forma simplista pode afirmar-se que os

¹⁰ Os aspectos relacionados com a cura de argamassas são mais aprofundados no capítulo “comportamento de argamassas”.

componentes e os processos de execução e cura definem a estrutura porosa da argamassa. Por seu lado, a estrutura porosa afecta as principais características da argamassa tais como as resistências mecânicas, a permeabilidade à água e ao vapor de água, a absorção de água por capilaridade, a susceptibilidade às deformações, a resistência aos ciclos gelo/degelo, entre outras.

A porosidade é classificada segundo aspectos morfológicos. A morfologia da porosidade não é homogénea, tendo poros de diferentes tamanhos, formas, e distribuições diferentes.

1.5.1 Tipo de porosidade

Podem distinguir-se dois tipos de porosidade: a porosidade aberta e a porosidade fechada. A porosidade fechada é constituída por poros ou agrupamentos de poros que estão isolados no interior do material. Estes poros, ao não terem ligação com outros poros nem com a superfície do material, são de acesso muito difícil. Geralmente, considera-se negligenciável a percentagem de porosidade fechada. A porosidade aberta forma uma rede contínua de vazios pois os poros comunicam todos entre si e com a superfície do material. Apenas este tipo de porosidade aberta contribui para o transporte de fluidos através do material. A porosidade aberta pode ainda apresentar um tipo distinto de poros, os poros cegos que apenas por uma das suas extremidades contactam com a rede porosa aberta [68].

1.5.2 Dimensão dos poros

A classificação da dimensão dos poros em determinados intervalos é fundamental. Existem variadas classificações, sendo que cada autor adopta aquela que melhor se adapta ao fenómeno que está a estudar. De acordo com a maioria dos autores, existem três tipos de poros consoante a sua dimensão: microporos, poros capilares e grandes poros.

Os microporos, que representam geralmente a menor percentagem da porosidade da argamassa, possuem diâmetros inferiores a 0,02 μm . São os que têm menor importância na influência da porosidade no comportamento do material.

Os poros capilares têm diâmetros de 0,02 a 1 μm e são os principais responsáveis pela absorção de água por capilaridade. São os que constituem a maior parte da porosidade das argamassas e são formados, geralmente, pelo espaço que a água livre liberta depois de evaporar.

Os grandes poros possuem diâmetros superiores a 1 μm e são causados por diversos factores de entre os quais: tipo de ligante, tipo e quantidade de agregado, relação água-ligante, ar aprisionado na mistura, ou a um introdutor de ar se for o caso de uso do mesmo. Estes poros aparecem em maiores quantidades nas argamassas com ligantes aéreos [15-vol. 3, 60, 5, 13].

1.5.3 Forma dos poros

A forma dos poros pode ser descrita em três tipos principais: cilíndricos, esféricos e os poros fissura [68].

Os poros cilíndricos são devidos ao espaço ocupado pelo excesso de água de amassadura. A porosidade das argamassas é maioritariamente formada por estes poros, sendo estes os que mais influenciam a permeabilidade das argamassas e a sua absorção de água por capilaridade.

Os poros esféricos resultam, maioritariamente do ar que fica aprisionado no interior da argamassa durante a mistura ou aplicação, podendo advir também da aplicação de um introdutor de ar. Este tipo de poros reduz a água absorvida por capilaridade, não só por terem grandes dimensões, mas também por estarem na maioria das vezes isolados no interior da argamassa.

Os poros-fissura são originados pela retracção das argamassas no seu processo de endurecimento. Este tipo de poros está relacionado com o tipo de ligante, tipo de agregado, e com os índices água/ligante e ligante/agregado. O aparecimento destes poros favorece a absorção de água por capilaridade e a permeabilidade das argamassas [64, 60, 61].

1.6 Absorção de água por capilaridade

A capilaridade é definida como a penetração de um líquido (geralmente água) na argamassa por efeito da tensão superficial gerada na interface água-ar-parede do poro. Depende essencialmente da quantidade, dimensão e conectividade dos poros.

Quando um fluido entra em contacto com poros finos, cria uma diferença de pressão ΔP entre a superfície livre do líquido e a superfície do mesmo líquido no poro; no caso de molhar perfeitamente a superfície do poro, o líquido sobe e preenche-o [15-vol. 3,3,4]. Esta relação é expressa pela seguinte expressão:

$$P = \frac{2\gamma}{r} \quad (1.1)$$

em que γ é a tensão superficial do fluido, P a pressão da ascensão capilar e r o raio do poro.

O efeito da capilaridade pode ser analisado em termos de velocidade inicial de absorção e em termos de quantidade total de água absorvida. Poros de menores dimensões dão origem a menores velocidades iniciais de absorção mas a maior quantidade de água absorvida. Por outro lado, a conectividade da rede porosa, assim como, naturalmente, a própria porosidade aberta, são propriedades que condicionam a absorção de água por capilaridade. Rato [68] explicita estes factos ao afirmar: “a resistência à ascensão capilar é determinada pelos poros mais pequenos”.

Em geral, a absorção de água por capilaridade dá-se quando uma das faces do material está em contacto com a água, originando fenómenos de sucção no sentido ascendente. No caso de ensaios laboratoriais, Rato [68] reporta que a absorção capilar é rápida inicialmente, diminuindo de seguida o ritmo até à estabilização. O autor explica esta diferença de ritmo pelo facto de a água penetrar primeiro nos poros maiores acessíveis, sendo os mais pequenos (onde a absorção é mais lenta) e os poros cujo acesso depende destes, preenchidos posteriormente.

O comportamento das argamassas à absorção capilar é avaliado através do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico da curva que relaciona a quantidade de água absorvida com o tempo. O coeficiente de capilaridade permite conhecer a velocidade

com que a água é inicialmente absorvida pelo material; o valor assintótico corresponde à quantidade total de água absorvida [15-vol. 3].

Este fenómeno é um dos principais responsáveis pela degradação de edifícios, sendo também um dos principais factores de risco de degradação das argamassas por ciclos gelo/degelo.

1.7 Difusão do vapor de água

A difusão de vapor de água é um processo pelo qual o vapor de água pode passar através de uma argamassa devido a um gradiente de concentração; esta difusão é possível devido à diferença de concentração de vapor de água que existe entre a argamassa e o meio ambiente que a envolve [15-vol. 3].

O processo de difusão de vapor de água acontece, geralmente, devido à secagem, por evaporação, da água previamente absorvida pela argamassa. Este processo revela uma grande importância, pois a taxa de secagem determina a duração do humedecimento.

O processo de difusão assume uma enorme complexidade, mas analisando a estrutura porosa a uma escala macroscópica simplifica-se a compreensão. Sendo assim, um aumento da porosidade aberta fará aumentar o coeficiente de difusão; a conectividade entre poros assume também um papel fundamental, sendo que, os poros cegos não contribuem para a passagem do vapor de água [68].

A lei de Fick caracteriza a difusão de vapor de água através de uma argamassa:

$$Q = D \frac{A \Delta C}{l} t \quad (1.2)$$

em que:

Q – massa do conjunto de ensaio (g)

D – coeficiente de difusão de vapor de água (m²/s)

A – área do provete (m²)

ΔC – gradiente de concentração (g/m³)

l – espessura do provete (m)

t – tempo (s)

Através dos seus estudos, Mosquera *et al* [60] referem que as argamassas de cal aérea têm um coeficiente de difusão de vapor de água significativamente maior que as constituídas com outros ligantes; as argamassas de cimento são as que apresentam um menor valor e as argamassas de cal hidráulica e as bastardas têm valores intermédios. Estes resultados confirmam as afirmações acima pois, geralmente, as argamassas de cal aérea apresentam maiores valores de porosidade aberta [60, 61].

1.8 Comportamento de argamassas em climas frios

As temperaturas muito baixas sentidas em climas frios são um factor muito importante na durabilidade das argamassas. A água, um dos principais agentes agressores para este tipo de material, exponencia o seu efeito neste tipo de climas. A principal causa de degradação, nestas condições, são os ciclos gelo/degelo, processo pelo qual a água no interior da argamassa cristaliza e liquidifica sucessivamente.

A durabilidade de uma argamassa aos ciclos gelo/degelo está dependente da sua capacidade para:

- Resistir à penetração de água;
- Perder água rapidamente para prevenir a saturação;
- Ter uma estrutura porosa que permita resistir à tensão provocada pelo aumento de volume da água quando passa ao estado sólido.

1.8.1 Processo de congelação

1.8.1.1 Temperaturas / Volumes da água

No ambiente exterior, segundo Chatterji [11], a temperatura da água no interior da argamassa raramente desce abaixo de -10°C. Na figura 2.3 é apresentado o volume específico da água a diferentes temperaturas.

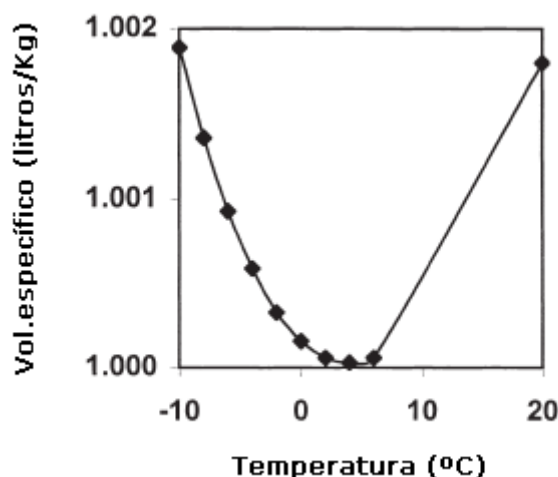


Figura 1.3 - Volume específico da água a diferentes temperaturas [11]

A figura mostra que a diminuição da temperatura até sensivelmente os 4°C faz diminuir o volume específico da água; é visível também que a partir dos 4°C o volume específico aumenta com a diminuição da temperatura. Este aumento de volume significa que a estrutura porosa, saturada com água a 4 °C, vai estar supersaturada de água à temperatura de congelação e inferior. A supersaturação¹¹ provoca pressão no corpo da estrutura porosa, e o resultado desta acção é a saída da água para o exterior ou para poros contíguos não saturados [55,40]. Importa salientar que, a argamassa pode atingir a saturação antes da temperatura da água ser de 4 °C.

Na análise da figura 1.3 não deixa de ser curioso o facto das densidades da água a temperaturas tão diferentes como -10 °C e 20 °C serem iguais.

1.8.1.2 Congelação da água

A água, quando sujeita a temperaturas negativas no interior da argamassa, vai congelando na sua estrutura porosa; este é, a nível microscópico, um processo complexo e com fases variadas. A congelação dá-se da superfície da camada em direcção ao interior, pois é na superfície que primeiramente se fazem sentir as temperaturas negativas. A velocidade de redução da temperatura no interior de estruturas correntes de betão armado foi estimada entre 1,7 e 5 °C/h, o que, segundo a maioria dos autores é

¹¹ - O termo supersaturação é usado na literatura internacional. Um poro supersaturado é aquele em que o volume de água aquando saturado vai aumentar para valores superiores ao volume do poro.

uma velocidade baixa. Numa argamassa é expectável que esta taxa seja superior, visto que, esta tem uma porosidade aberta maior em relação a um betão corrente.

Quando, no interior da argamassa, se fazem sentir temperaturas negativas, a água congela formando rapidamente uma massa de fibras de cristais de gelo junto das paredes do poro acompanhada de uma subida de temperatura para aproximadamente 0°C e um aumento do volume total. Nesta fase, as fibras de cristais estão separadas umas das outras por finas camadas de água. Seguidamente, esta massa solidifica, aumentando de volume, sendo que apresenta fraca resistência. Este processo continua até a água no poro estar completamente congelada. A figura 2.4 indica de uma forma simplificada o aumento de volume num poro devido à congelação da camada exterior da água [40].

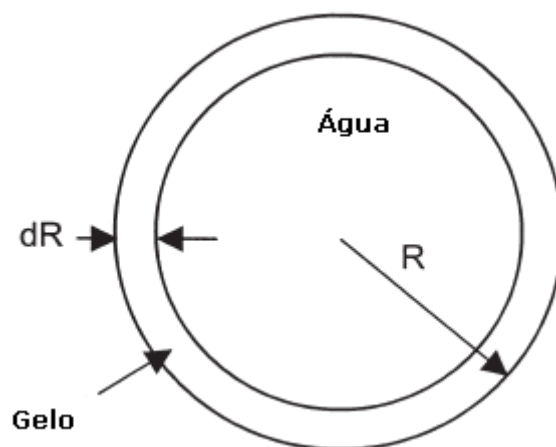


Figura 1.4 - Geometria de congelação [11]

No caso de um poro isolado, o desenvolvimento deste fenómeno é diferente daquele que se verifica na estrutura porosa corrente uma vez que as ligações entre poros (porosidade aberta) facilitam, em determinada fase do processo, a passagem de água.

A porosidade aberta das argamassas favorece a congelação da água no seu interior pois os poros estão interligados e têm possibilidade de trocas não só de água a temperaturas negativas como de cristais de gelo (cristais de pequena dimensão). Estas interligações de água e cristais de gelo na porosidade podem ser feitas por dois mecanismos: sob pressão exterior e/ou por congelação da água interior como já vimos acima.

A água interior congela segundo o modelo acima descrito mas com a diferença do poro ter ligação com outros. A água da superfície exterior do poro congela formando as

fibras de cristais de gelo no sentido do interior do poro; essas fibras, visto a conexão entre poros, podem ao longo do tempo em que o poro congela ir sendo misturadas na água por congelar e migrar para outros poros. A condição essencial para que isto aconteça é que a dimensão da fibra seja inferior ao poro para onde migra.

As interligações sob pressão exterior são provocadas, como o nome indica, por uma pressão vinda do exterior da argamassa através dos poros da superfície. Este mecanismo é idêntico ao anterior com a diferença de ter uma velocidade mais acelerada provocada pela pressão. Esta situação, na prática, acontece quando existe uma massa de gelo ou neve encostada ou sobre a estrutura.

1.8.1.3 Tensão provocada pelo gelo

O aumento do volume resultante da congelação gera tensões que provocam a perda de coesão e causa deste modo a degradação. É de extrema importância salientar que só ocorrerão tensões sobre a argamassa caso os poros estejam saturados ou quase saturados; caso contrário, o aumento de volume resultante da congelação da água não afecta o material pois o volume final é inferior ao volume dos poros.

A resistência mecânica das argamassas aumenta com a congelação da água no seu interior devido ao baixar da temperatura. Para uma argamassa de cimento saturada, por exemplo, a resistência mecânica aumenta com a descida de temperatura entre os 0 e os -60°C. Este facto é devido, exclusivamente, à resistência mecânica do gelo.

Sabendo que a água líquida, quando congela, aumenta o volume em 9% [63], as pressões resultantes nas paredes dos poros saturados são grandes e podem provocar fissuras internas na argamassa e uma alteração da sua porosidade.

1.8.2 Ciclos gelo-degelo

1.8.2.1 Mecânica dos ciclos gelo-degelo

Os ciclos gelo/degelo têm um papel decisivo no comportamento e na durabilidade das argamassas.

A temperaturas negativas, a água que se encontra no interior da argamassa congela com o consequente aumento de volume (processo denominado “gelo”). Como referido anteriormente, se os poros não estiverem saturados, os problemas são mínimos pois o volume final é inferior ao volume dos poros. No caso de os poros se encontrarem saturados, ou quase saturados, o aumento de volume resultante da congelação dá origem a pressões exercidas nas paredes dos poros, podendo originar fissuração. No processo de descongelação (denominado “degelo”) a quantidade de água que anteriormente cristalizou retoma o seu volume inicial. No decorrer deste processo duas situações distintas podem ocorrer: a secagem parcial ou total por via da mudança de fase para vapor e pela consequente difusão; a absorção de nova quantidade de água por capilaridade. Termina assim um ciclo, sendo que a diminuição posterior da temperatura dá início a um novo ciclo.

Entende-se fazer algumas considerações ao processo acima descrito. Ao longo dos ciclos, os poros vão tendo menor capacidade para resistir às pressões exercidas pelo gelo e, à medida que aumenta o número de ciclos, vão apresentando maior fissuração. Uma argamassa saturada durante e após o seu processo de degelo pode absorver mais água devido às fissuras provocadas pelas pressões no seu processo de gelo.

A resistência das argamassas aos ciclos gelo/degelo apresenta também uma relação directa com a temperatura mais baixa dos ciclos. A figura 2.5 mostra esta relação num betão testado por Cai e Liu [7].

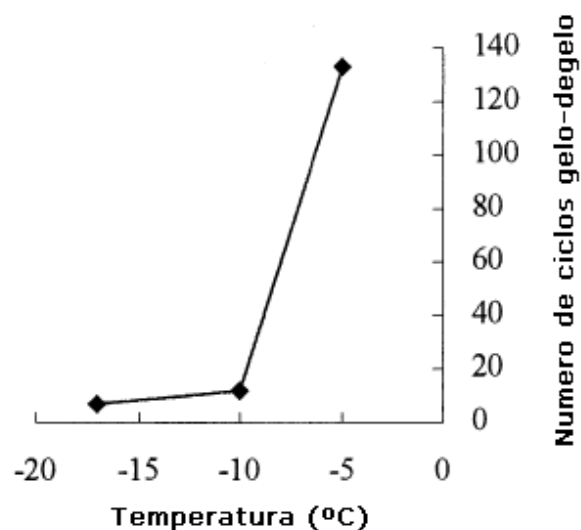


Figura 1.5 - Durabilidade do betão em relação à temperatura mais baixa nos ciclos gelo degelo [7]

A água nos poros congela mais rapidamente entre 0 e -10 °C do que abaixo de -10 °C. Segundo Powers, citado por Cai e Liu [7], uma maior velocidade de congelação leva a uma maior pressão interna; deste modo, a argamassa sofre efeitos mais destrutivos entre os 0 e os -10 °C. A explicação para este facto tem origem na conectividade dos poros. A água, nos poros com ligações a outros poros congela primeiro, e nos poros isolados geralmente congela depois.

A figura 1.6 mostra esquematicamente dois ciclos gelo/degelo.

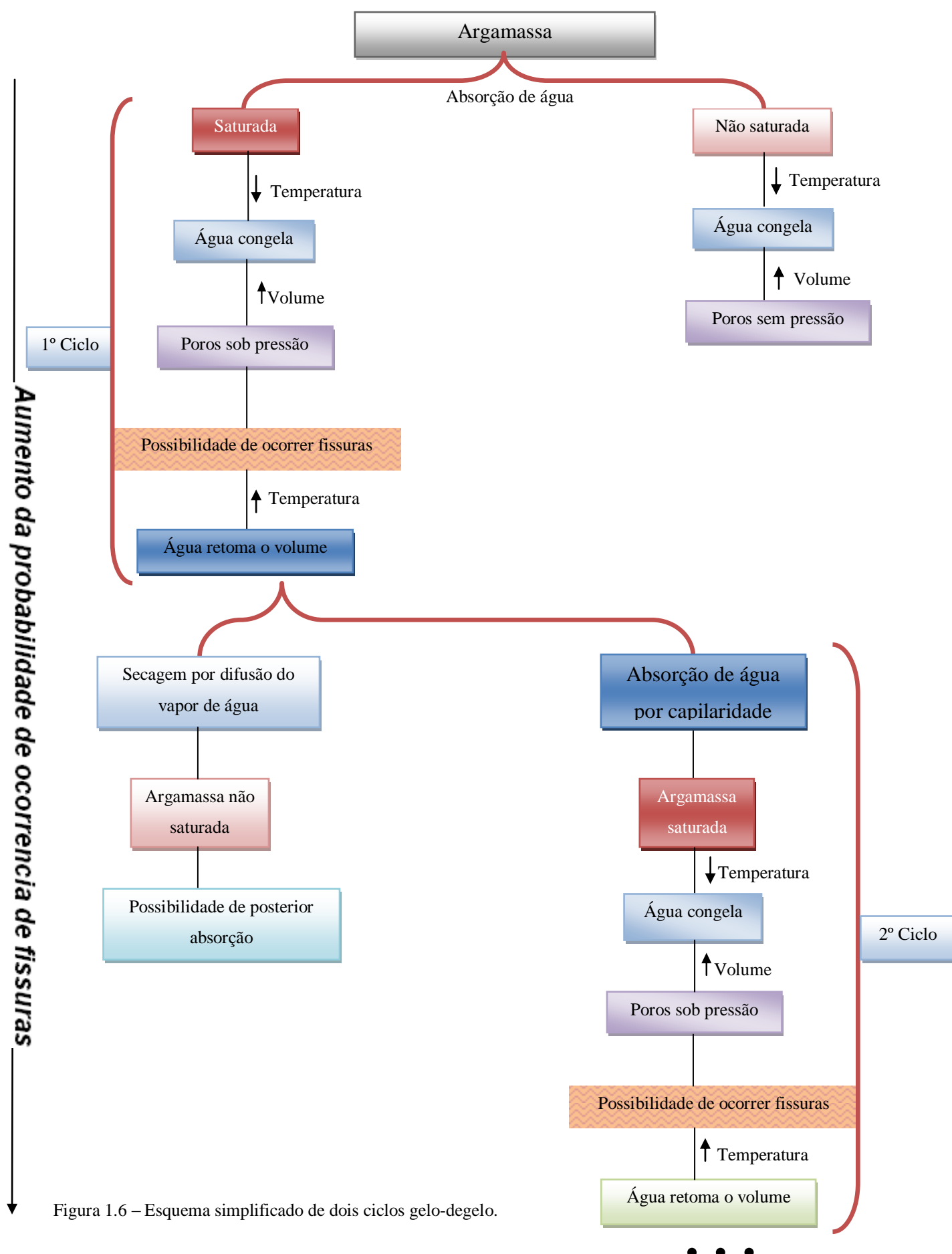


Figura 1.6 – Esquema simplificado de dois ciclos gelo-degelo.

1.8.2.2 Magnitude da tensão causadora de danos

A pressão interna provocada pelo aumento de volume resultante de congelação dá origem a danos na argamassa, quando a sua magnitude assume valores de cerca de duas vezes a resistência à tracção da zona da argamassa onde se deu a congelação. Chatterji [12] afirma que a resistência à tracção de um betão corrente saturado é de 2,5 MPa a uma temperatura ambiente, o que significa, segundo o mesmo, que, contendo gelo, tenha uma resistência à tracção de cerca de 4 MPa a -10 °C e 6 MPa a -20 °C. Para causar danos neste betão a força produzida pelo gelo terá de ser da ordem de 8 MPa a 12 MPa.

Não foram encontrados registos deste tipo de ensaios em argamassas de cal, havendo apenas informação disponível relativa a betão. É importante salientar ainda que raramente se consegue conhecer com exactidão a que temperaturas ocorrem os danos [12].

1.8.2.3 Tipos de danos

Os tipos de danos provocados nas argamassas pelos ciclos gelo/degelo podem ser generalizadamente agrupados em dois grupos: fissuras internas e desagregação de superfície, conhecida internacionalmente por “surface scaling”.

As fissuras internas foram o tipo de deterioração abordado até aqui. Estas fissuras propagam-se pela porosidade aberta de acordo com as ligações entre os poros [14]. Geralmente, as fissuras propagam-se na superfície dos agregados, pois o interface ligante-agregado é a zona mais frágil da argamassa [14,8].

A desagregação de superfície é facilmente observável pois, são visíveis as fissuras e algum material pulverulento que a argamassa perde; é também notado um aumento de volume da argamassa. Como é sabido, a superfície exterior é a primeira a atingir temperaturas negativas, sendo este tipo de danos o primeiro a ocorrer. Para ciclos gelo/degelo curtos¹² este é o único tipo de danos na argamassa pois, o seu interior não chega a atingir temperaturas negativas, e assim, a água no interior não congela e não causa danos internos na estrutura porosa.

¹²- Entenda-se curtos como levando pouco tempo entre a fase de “gelo” e a fase de “degelo”.

1.8.3 Melhoramento do comportamento de argamassas aos ciclos gelo/degelo

Em certos casos, a necessidade de obter uma argamassa com bom comportamento aos ciclos gelo/degelo leva a que se tomem algumas medidas como o uso de introdutores de ar para melhorar a sua estrutura porosa a esse comportamento ou até recorrer a tecnologia e cálculos avançados de forma a prever os danos correspondentes a cada formulação de argamassas, para que, antecipadamente se saiba as precauções a tomar e os danos esperados. A melhoria da estrutura porosa tendo em conta este fenómeno, passa sempre por cortar os canais capilares.

1.8.3.1 Introdutor de ar

Um introdutor de ar tem o objectivo de alterar a porosidade das argamassas, fazendo com que estas no seu estado endurecido tenham uma maior quantidade e melhor distribuição dos vazios. Estes produtos são colocados na fase de amassadura tendo ainda como consequência uma melhoria da trabalhabilidade [14-vol. 1].

O introdutor de ar faz com que parte dos vazios se transforme em vazios esféricos e de dimensões superiores aos vazios capilares [13].

A molécula de um introdutor de ar é composta por um grupo hidrófilo e por um grupo hidrófobo¹³. Em meio aquoso, e considerando o ar aprisionado no interior da argamassa fresca, estas moléculas orientam-se no interface ar-água de forma a que a extremidade hidrófila fique em contacto com a água e a extremidade hidrófoba fora dela, formando-se assim vazios esféricos estáveis como indicado na figura 1.7.

¹³ - Uma substância hidrófoba é repelente de água. Uma substância hidrófila, como referido no capítulo “Ligantes” tem afinidade por água.

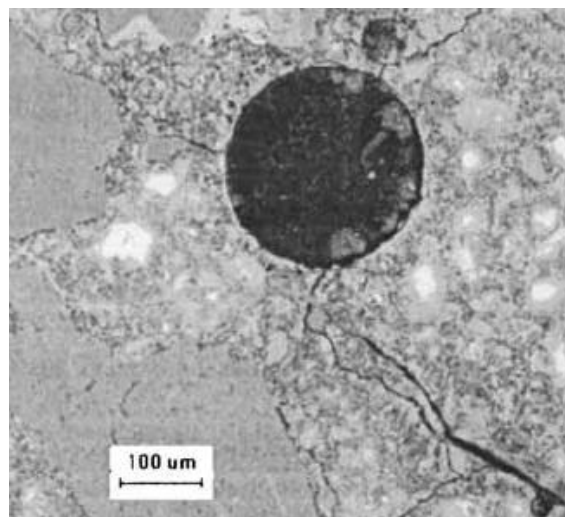


Figura 1.7 – Vazio esférico no interior da argamassa formada pelo introdutor de ar [81]

A trabalhabilidade é um factor que, no estado fresco da argamassa, é muito melhorado. O ar introduzido desempenha um papel de fluido e de inerte. Como fluido substitui parte da água de amassadura, fazendo com que se reduza a quantidade de água em excesso usada unicamente para melhoria de trabalhabilidade. Como inerte, substitui os grãos de areia menores que 1 ou 2 mm e apresenta sobre esta a vantagem de ser deformável, elástico e poder deslizar sem atrito [15-vol. 1].

Na fase fresca da argamassa, a maioria dos factores são melhorados inclusive a compactação, que é facilitada pois os vazios actuam como lubrificantes. Na fase endurecida, o aumento de porosidade faz com que a argamassa tenha menores resistências mecânicas [7].

Os vazios resultantes do adjuvante introduzido interseccionam os canais capilares da porosidade da argamassa, o que implica que a absorção de água por capilaridade seja significativamente reduzida [19].

Os grandes poros esféricos que resultam da acção do introdutor de ar desempenham um papel importante na durabilidade das argamassas porque não são saturados ainda que a restante estrutura porosa se encontre totalmente preenchida por água. Sujeitas à pressão, os vazios esféricos introduzidas são locais de expansão para a água impelida pelo aumento do volume de gelo como do próprio gelo. Estas características têm maior eficácia quando as bolhas têm uma dimensão adequada, o volume de ar é suficiente e as bolhas estão bem repartidas na massa da argamassa.

1.8.3.2 Previsão de danos

Como já mencionado, o comportamento das argamassas aos ciclos gelo/degelo é um processo complexo. Com o objectivo de estimar os danos provocados em betão foi desenvolvido um modelo denominado “response surface method” (RSM). Este modelo matemático e estatístico é usado para o estudo de inúmeros aspectos relacionados com o comportamento do betão, incluindo os danos devidos aos ciclos gelo/degelo.

O RSM permite identificar o dano acumulado em estruturas de betão afectadas por ciclos gelo/degelo desenvolvendo um modelo como função das variáveis: estrutura porosa, rácios de mistura entre os componentes e número de ciclos gelo-degelo. Este método permite ainda prever os danos internos provocados pelos ciclos gelo/degelo, determinando um critério comparativo com resultados experimentais e uma função números de ciclos gelo/degelo/dano acumulado [14].

O RSM só trabalha com betão, sendo que é necessário estender este tipo de estudos a argamassas e a outro tipo de ligantes.

1.8.4 Ensaio unidireccional e omnidireccional

No caso do comportamento de argamassas em climas frios, e mais propriamente do comportamento aos ciclos gelo/degelo, existem dois tipos de ensaios: o unidireccional e o omnidireccional. O ensaio unidireccional é feito geralmente para teste de alvenarias, no qual se ensaia o conjunto argamassa-alvenaria reproduzindo as condições exteriores (humidade e temperatura) segundo uma única superfície do conjunto. O ensaio omnidireccional é feito maioritariamente para teste de provetes de argamassas, onde as condições exteriores são reguladas por uma câmara climática afectando o provete em todas as suas faces.

Os diversos trabalhos relativos ao estudo do comportamento de argamassas sujeitas a ciclos gelo/degelo revelam conclusões diversas acerca das vantagens e desvantagens destes métodos. A maioria dos autores usa o ensaio omnidireccional pois este é mais facilmente executável e virado exclusivamente para as propriedades da argamassa. Tate *et al* [76] referem que o teste omnidireccional não deve ser usado para avaliar o comportamento de conjuntos de argamassas e alvenaria.

1.9 Comportamento de argamassas

Diferentes composições de argamassas conduzem a comportamentos distintos. Este sub-capítulo tem como objectivo referir, de forma genérica, a relação dos vários constituintes com o comportamento de argamassas.

Para cada tipo de argamassa, são explanados os processos e efeitos conhecidos desde a sua execução. É ainda de salientar que o capítulo “argamassas bastardas” tem uma abordagem essencialmente comparativa em relação às outras argamassas pois é dessa forma que os autores dos trabalhos de investigação deste tipo de argamassas procedem à sua caracterização.

1.9.1 Argamassas de cal aérea

As argamassas de cal aérea são usadas há séculos e apresentam algumas vantagens em relação às argamassas de cimento:

- Compatibilidade física e química com argamassas aplicadas em edifícios antigos devidas às suas similares composições;
- Um comportamento mecânico muito diferente das argamassas de cimento, sendo mais deformáveis, acompanhando mais facilmente os movimentos das estruturas;
- Custo reduzido devido ao baixo preço da cal como ligante.

As argamassas de cal aérea, como foi descrito em 1.2.1.2, endurecem por carbonatação. Este processo é lento, podendo durar vários anos, daí a importância do tempo de cura.

Lanas e Alvarez [53] referem que as resistências mecânicas aumentam com o tempo de cura, no entanto, o momento em que a argamassa atinge o pico das resistências mecânicas, bem como o grau de carbonatação das argamassas é desconhecido. Os mesmos autores no seu estudo sobre argamassas de cal aérea concluem que, para estas, as resistências mecânicas depois de 365 dias de cura eram em média o dobro das resistências mecânicas depois de 28 dias de cura.

Num estudo que visou a conjugação de conceitos e interligação de processos, Lanas e Alvarez [10] chegaram a conclusões muito interessantes acerca de quantidade de cal aérea, relação cal aérea – agregado e porosidade. Como indicado anteriormente, a

redução da porosidade causa aumento das resistências mecânicas; no entanto, em argamassas de cal aérea, quantidades consideráveis do ligante em relação ao agregado (traços fortes) causam um aumento da porosidade devido à finura e superfície específica da cal. Contrariamente às argamassas de cimento, as argamassas de cal aérea com maiores resistências mecânicas são as que apresentam maior porosidade, como exemplificado em relação à resistência à compressão na figura 1.8.

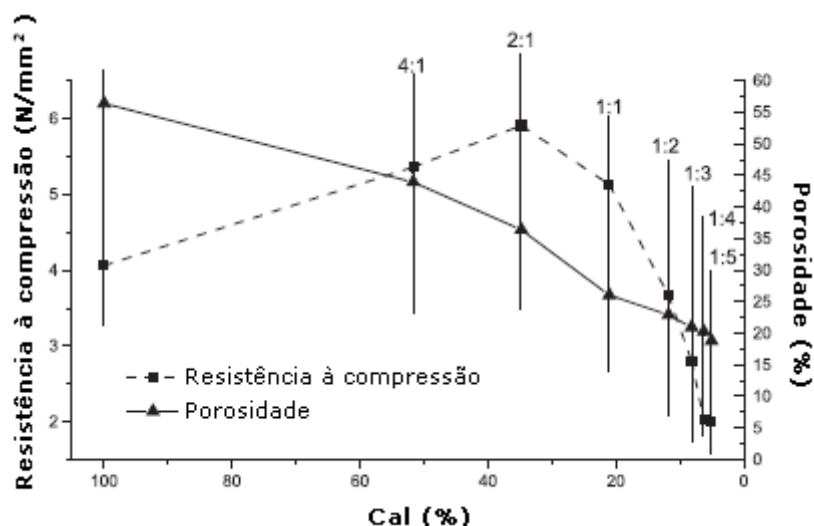


Figura 1.8 – Porosidade e resistência à compressão versus percentagem de cal numa argamassa de cal [53]

A explicação contempla vários factores:

- Um aumento da quantidade de ligante aumenta as resistências mecânicas pois forma uma estrutura interna contínua e mais compacta. Um aumento da quantidade de agregado causa maiores discontinuidades na estrutura interna da argamassa, bem como aumenta as interfaces ligante – agregado (como se viu anteriormente é uma parte muito fraca da argamassa).
- A porosidade aberta aumenta para grandes quantidades de ligante, este factor tem influências contrárias no comportamento mecânico da argamassa:
 - Um aumento de poros leva a uma redução das resistências mecânicas.
 - Um aumento do grau de carbonatação provoca um aumento das resistências. O aumento da porosidade na argamassa permite uma mais rápida e completa chegada do dióxido de carbono dentro da argamassa.

A quantidade de água de amassadura tem uma influência preponderante no comportamento da argamassa. Da investigação de Arandigoyen *et al* [3] conclui-se que o aumento da quantidade de água na amassadura leva a um aumento significativo na porosidade e na absorção de água por capilaridade. Como é sabido a água de amassadura nas argamassas de cal aérea serve unicamente para conferir trabalhabilidade à mistura; esta água vai evaporar e deixar vazios no seu lugar aumentando a porosidade.

A existência de consenso nas conclusões de que a resistência aos ciclos gelo/degelo das argamassas de cal aérea é menor do que a das outras argamassas é inequívoca. Lanas *et al* [52] realizaram um ensaio de ciclos gelo/degelo com os seguintes passos repetidos a cada ciclo: (1) imersão em água até os provetes estarem completamente saturados e (2) colocados numa câmara climática a -10 °C, sem estarem imersos, até congelarem completamente¹⁴. Nestas condições os provetes só suportaram 3 ciclos¹⁵. A figura 1.9 mostra a evolução dos danos provocados pelos ciclos gelo/degelo.

¹⁴ - É conveniente referir que estas condições são extremamente agressivas para os provetes, pois antes de entrar na câmara climática foram novamente imersos.

¹⁵ - O número de ciclos irá ser posteriormente comparado com provetes de cal hidráulica inseridos no mesmo estudo no capítulo “argamassas de cal hidráulica”.

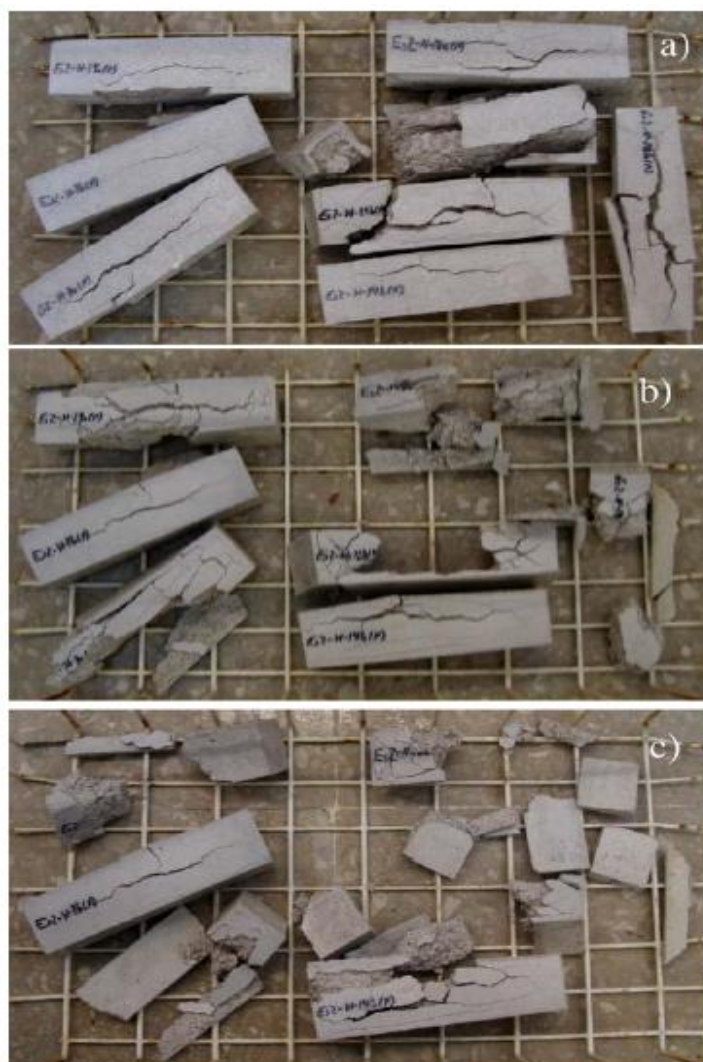


Figura 1.9 – Evolução dos danos nos provetes depois de: a) 1 ciclo; b) 2 ciclos; c) 3 ciclos [52]

1.9.2 Argamassas de cal hidráulica

As argamassas de cal hidráulica são argamassas cujas características se podem considerar intermédias em relação às argamassas de cal aérea e cimento Portland, apresentando algumas vantagens em relação a elas:

- Propriedades hidráulicas que lhe permitem a reacção com a água para o seu endurecimento.
- Um comportamento mecânico muito diferente das argamassas de cimento Portland, é mais deformável e acompanha mais facilmente os movimentos das estruturas.
- Maiores resistências mecânicas em relação às argamassas de cal aérea.

Lanas *et al* [54] estabelece uma relação entre o traço da argamassa e a quantidade de ligante com o tempo de cura e as suas resistências mecânicas. No seu estudo conclui que as argamassas com maior quantidade de ligante de traço 1:1 e 1:2 adquirem 50% das suas resistências mecânicas aos 28 dias de cura, enquanto que as argamassas de traços mais fracos de 1:3, 1:4 e 1:5 adquirem 85 a 90% das suas resistências mecânicas com o mesmo tempo de cura. Este facto permite concluir claramente que argamassas com maior quantidade de ligante necessitam de mais tempo para hidratar e aumentar as suas resistências mecânicas na fase de endurecimento como pode ser exemplificado na figura 1.10 que mostra a evolução da resistência à compressão de várias argamassas com traços diferentes em função do tempo de cura.

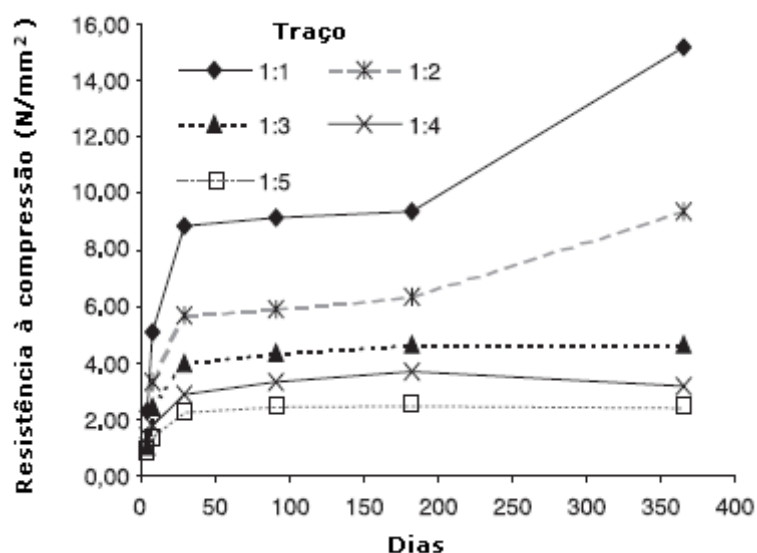


Figura 1.10 – Resistência à compressão de argamassas versus tempo de cura [54]

A relação quantidade de ligante – porosidade – resistências mecânicas é praticamente a mesma da que se verifica com a cal aérea. Uma maior quantidade de ligante conduz a uma maior porosidade e maiores resistências mecânicas.

As argamassas de cal hidráulica apresentam uma maior velocidade de absorção e uma maior quantidade de água absorvida em relação às argamassas de cal aérea, bem como maiores resistências mecânicas. No que diz respeito à difusão de vapor de água as argamassas de cal hidráulica apresentam um coeficiente de difusão menor que as argamassas de cal aérea.

O uso de um introdutor de ar é descrito pelos autores como tendo as mesmas consequências que nas argamassas de cimento; Seabra *et al* [72] referem que a mistura de um introdutor de ar melhora o comportamento das argamassas em zonas frias mas baixa a resistência mecânica; por sua vez, Maurenbrecher *et al* [27] afirmam que argamassas de cal hidráulica com introdução de ar revelam um bom potencial na resistência aos ciclos gelo/degelo.

A água de amassadura nas argamassas de cal hidráulica tem o efeito não só de aumentar a trabalhabilidade mas também de hidratação do ligante para o seu endurecimento. Nestas argamassas, a água necessária para uma boa hidratação do ligante é mínima em relação à quantidade necessária para conferir uma boa trabalhabilidade.

As argamassas de cal hidráulica têm geralmente um bom comportamento aos ciclos gelo/degelo. A comparação entre estas argamassas e as argamassas de cal aérea fornece uma clara percepção entre as suas valências em relação a este comportamento. Lanas *et al* [52] realizaram um estudo comparativo entre os dois tipos de argamassas mediante as mesmas condições, variando exclusivamente o ligante e chegaram às conclusões descritas na tabela 1.1.

Ciclos	Graus de alteração											
	Argamassas de cal aérea						Argamassas de cal hidráulica					
	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
0	100	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
2	0	23.8	19	28.6	28.6	0	64.7	35.3	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	100	20	26.7	53.3	0	0	0
4	0	0	0	0	0	100	16.7	22.1	44.4	16.7	0	0
7	0	0	0	0	0	100	0	15.4	15.4	69.2	0	0
9	0	0	0	0	0	100	0	8.3	16.7	75.0	0	0
11	0	0	0	0	0	100	0	11.1	11.1	22.2	55.6	0

Quadro 1.1 - Avaliação qualitativa do grau de alteração dos provetes de argamassa afectados por ciclos gelo/degelo: percentagem dos provetes em diferentes graus de alteração [52]

O quadro relaciona o número de ciclos gelo/degelo com a percentagem de provetes que pertencem a cada grau de alteração. O grau de alteração 0 corresponde a um provete sem alterações, o grau de alteração 5 corresponde a um provete completamente

destruído. A figura 2.11 mostra a evolução dos danos provocados pelos ciclos gelo/degelo¹⁶ nos provetes de cal hidráulica.



Figura 1.11 - Evolução dos danos nos provetes depois de: a) 1 ciclo; b) 3 ciclos; c) 11 ciclos [52]

¹⁶ - Esta figura é comparável com a figura 1.9 do capítulo “argamassas de cal aérea”, já que, as condições do ensaio são idênticas.

1.9.3 Argamassas bastardas

As argamassas bastardas são constituídas por ligantes aéreos e hidráulicos. No âmbito deste trabalho, interessa estudar as formadas por cal aérea e cimento Portland. Estas argamassas têm características intermédias entre as argamassas formadas com apenas um destes ligantes. O objectivo destas argamassas é aproveitar as melhores características de cada um dos ligantes e reduzir o efeito das piores para o objectivo que a argamassa se destina a cumprir.

Na fase de endurecimento destas argamassas distinguem-se dois processos: inicialmente, o processo de hidratação do cimento e à medida que este processo se vai desenvolvendo começa a carbonatação da cal. A carbonatação da cal dá-se depois, já que, com a hidratação do cimento e a evaporação da água da argamassa, esta vai ficando com mais vazios por onde o dióxido de carbono pode circular mais livremente.

O tempo de cura é menor que as argamassas de cal e maior que as argamassas de cimento, aproximando-se mais de um ou de outro consoante a percentagens de cada um dos ligantes.

A porosidade em geral (tanto a aberta como a fechada) destas argamassas aumenta com o aumento de cal aérea na mistura. Mosquera *et al* [60] fizeram uma comparação entre argamassas de cal aérea, hidráulica e bastardas e chegaram a resultados consensuais entre todos os autores. Através do quadro 1.2 que mostra o valor da porosidade, podemos observar que as argamassas de cal aérea apresentam um maior valor de porosidade e à medida que a quantidade de cimento aumenta nas argamassas bastardas a porosidade vai diminuindo. A argamassa de cal hidráulica tem um comportamento intermédio.

Mistura	Porosidade (Vol.%)
Areia/cal aérea 3:1	25.75
Areia/cal aérea/cimento 27:8:1	25.39
Areia/cal aérea/cimento 27:6:3	21.06
Areia/cal aérea/cimento 27:4.5:4.5	18.44
Areia/cal hidráulica 3:1	22.04

Quadro 1.2 - Percentagem de porosidade em relação ao volume total de argamassa [60]

O aumento da cal aérea na mistura faz aumentar a porosidade [31], a capilaridade [4] e a difusibilidade ao vapor de água [60]. O trabalho de Mosquera *et al* [61] revela ainda que o aumento da porosidade leva a uma redução das resistências mecânicas e um aumento da difusibilidade. A figura 1.12 demonstra essa situação.

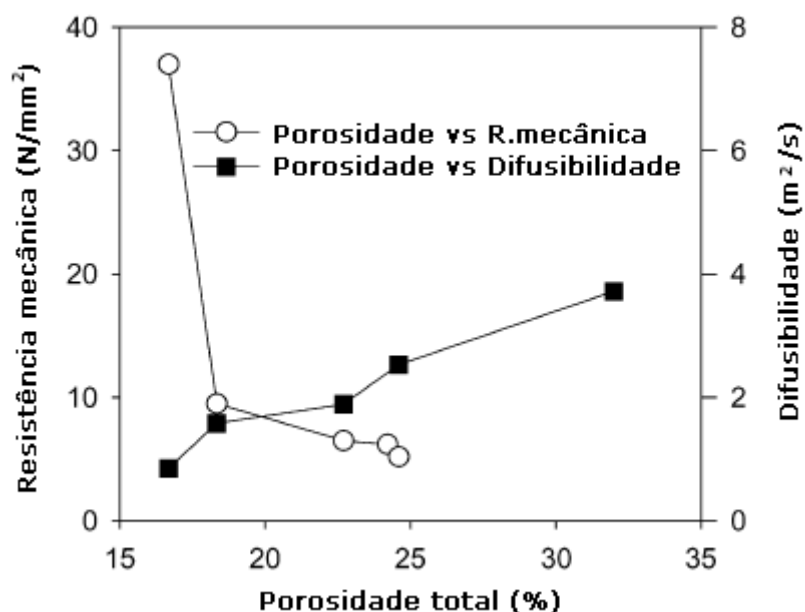


Figura 1.12 - Relação entre resistência mecânica, difusibilidade do vapor de água e porosidade [61]

Dhir, no seu estudo comparativo entre argamassas com e sem introdutor de ar [31], concluiu que as diferenças na resistência aos ciclos gelo/degelo entre argamassas bastardas e argamassas de cimento eram quase inexistentes. Para argamassas sem introdutor de ar, o aumento da cal aérea revela pior comportamento neste aspecto. Tate *et al* [76] referem uma diferença mínima no comportamento deste tipo de argamassas com e sem introdutor de ar.

Parte II – Desenvolvimento Experimental

2 Descrição dos procedimentos de ensaio

2.1 Materiais utilizados

2.1.1 Areias

No trabalho experimental foram usados três diferentes tipos de areia: duas areias com características granulométricas controladas e uma areia de rio corrente. A principal diferença entre as três areias é a dimensão das partículas. Por ordem crescente de granulometria foram usadas as areias FPS 120, areia de rio e AGS 1/2.

A razão do uso das duas areias de granulometria controlada e grande disparidade em relação à granulometria da areia de rio (areia corrente usada em construção) foi o facto de se pretender estabelecer limites superior e inferior de comportamento das argamassas por variação da influência da granulometria dos agregados.

A areia de rio é comercializada a granel e, devido ao facto de não lhe ser efectuado nenhum tipo de crivação ou tratamento, apresenta algumas impurezas apesar de ser uma areia lavada. No tratamento desta areia para o seu uso apenas houve o cuidado de retirar alguns seixos e desfazer alguns torrões, visto que, a serem usados no trabalho laboratorial, poderiam condicionar os resultados.

As areias FPS 120 e AGS 1/2 são areias comercializadas em sacos e têm as suas características granulométricas e constituição controladas. No tratamento destas areias para uso apenas se teve o cuidado de misturar todo o conteúdo do saco e retirar o necessário de todas as zonas deste. A figura 2.1 mostra as curvas granulométricas das areias usadas no desenvolvimento experimental do trabalho.

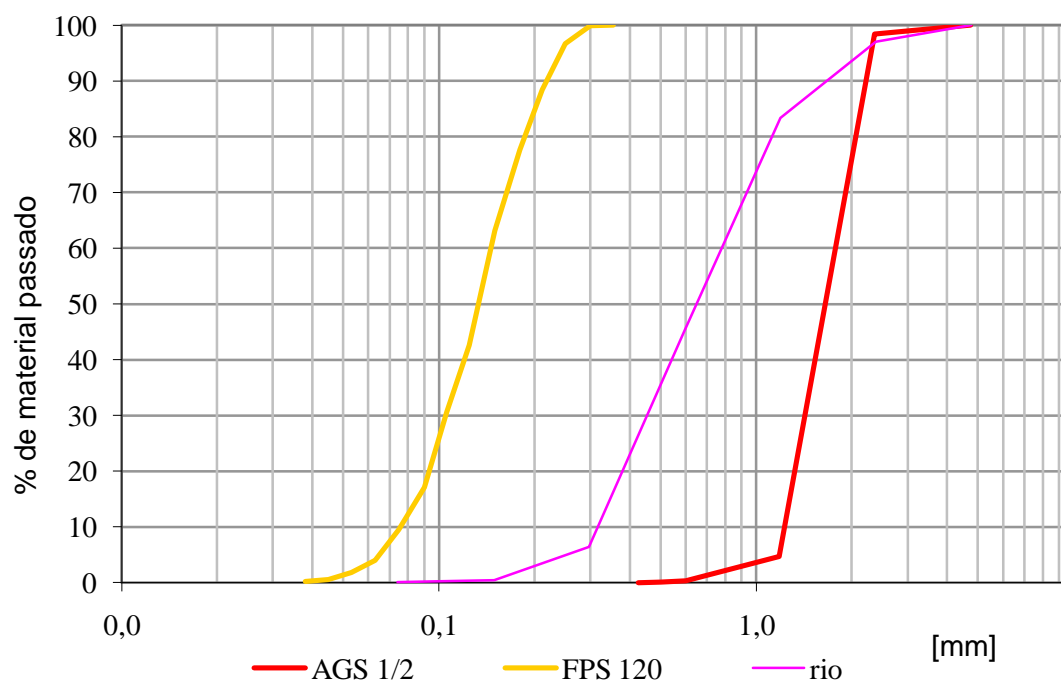


Figura 2.1 - Curvas granulométricas das areias usadas no desenvolvimento experimental

2.1.2 Ligantes

No desenvolvimento experimental foram usados três ligantes diferentes no que diz respeito à sua constituição e, conseqüentemente ao tipo de endurecimento e às respectivas propriedades conferidas às argamassas no seu estado endurecido. Os três ligantes usados foram: cal aérea, cal hidráulica e cimento Portland.

Os ligantes foram usados sob forma de pó e foram adquiridos em sacos com todas as características físicas e químicas controladas. A cal aérea é uma cal hidratada comum, a cal hidráulica é uma NHL5¹⁷ e o cimento é proveniente das fábricas Secil e é um CEMII/B-L 32,5N.

Todos os ligantes foram colocados em recipientes selados aquando da tiragem dos sacos. Este procedimento teve uma velocidade de execução elevada para evitar ao máximo o contacto dos ligantes com a atmosfera.

¹⁷ - NHL5 é considerada uma cal fortemente hidráulica, desenvolvendo, em relação às outras, maiores resistências mecânicas.

2.1.3 Água

A água usada na amassadura é da rede pública. Regra geral, todas as águas potáveis podem ser usadas na amassadura de argamassas e betões. É ainda aceitável que, mesmo não sendo potáveis, as águas sem sabor e sem cheiro possam ser utilizadas [15-vol. 1].

2.1.4 Introdutor de ar

Um introdutor de ar foi usado em algumas argamassas de forma a alterar a sua porosidade e permitir verificar a influência deste componente nos ensaios realizados, nomeadamente a sua eficácia na resistência aos ciclos gelo/degelo.

O introdutor de ar utilizado foi o Sika-AER 5, produto líquido de cor castanha. A dosagem e modo de aplicação são os recomendados pelo fabricante; a ficha técnica e informações acerca do produto encontram-se em anexo (anexo1).

A dosagem do introdutor usada no procedimento experimental foi 0,15% em relação à massa do ligante.

2.2 Argamassas e sistema de identificação de provetes

2.2.1 Argamassas

As argamassas, no desenvolvimento experimental, foram realizadas com combinações dos materiais referidos anteriormente.

Cada tipo de ligante foi combinado com cada uma das três areias e, para cada umas dessas combinações, realizaram-se ainda duas amassaduras diferentes fazendo variar a quantidade de água; para a primeira amassadura introduziu-se uma quantidade de água suficiente para se obter um valor de referência de 55% no ensaio de consistência por espalhamento, para a outra amassadura, uma quantidade de água superior de modo a se obter um valor de referência de 75% no mesmo ensaio.

As argamassas com introdutor de ar consideram combinações ligeiramente diferentes. Estas argamassas foram realizadas combinando os três ligantes com uma única areia

(areia de rio) e, para cada uma dessas combinações, foram realizadas duas amassaduras diferentes variando a quantidade de água, de modo a obter, tal como anteriormente, consistências por espalhamento de referência de 55% e 75%.

Todas estas combinações resultaram em 24 argamassas diferentes, as quais 18 sem introdutor de ar e seis com introdutor de ar.

O quadro 2.1 mostra um resumo das combinações realizadas no trabalho, bem como o traço ligante:agregado e o valor da consistência por espalhamento de cada combinação.

Quadro 2.1 – Traço, consistência e constituição de argamassas.

Material			Traço ligante:agregado	Valor de referência para o ensaio de consistência por espalhamento
Ligante	Areia	Introdutor de ar		
Cal aérea	AGS 1/2	-	1:2	55%
		-	1:2	75%
	Rio	-	1:2	55%
		-	1:2	75%
	FPS 120	-	1:2	55%
		-	1:2	75%
Cal hidráulica	AGS 1/2	-	1:3	55%
		-	1:3	75%
	Rio	-	1:3	55%
		-	1:3	75%
	FPS 120	-	1:3	55%
		-	1:3	75%
Cal aérea + cimento	AGS 1/2	-	1:1:6	55%
		-	1:1:6	75%
	Rio	-	1:1:6	55%
		-	1:1:6	75%
	FPS 120	-	1:1:6	55%
		-	1:1:6	75%
Cal aérea	Rio	✓	1:2	55%
		✓	1:2	75%
Cal hidráulica		✓	1:3	55%
		✓	1:3	75%
Cal aérea + cimento		✓	1:1:6	55%
		✓	1:1:6	75%

Para cada uma das combinações foram executados seis provetes prismáticos e três provetes cilíndricos, estes, para o ensaio de difusão do vapor de água. No total, foram produzidos 144 provetes prismáticos e 72 provetes cilíndricos.

2.2.2 Identificação dos provetes

O sistema de identificação dos provetes é um procedimento muito importante para o correcto manuseamento dos provetes para ensaio.

Foi definido um sistema de identificação para os provetes de acordo com um código de cinco parâmetros, traduzidos nos provetes como uma sequência de números, letras e um símbolo que identifica as argamassas com introdutor de ar. Cada provete tem cinco ou seis caracteres seguidos consoante tenha ou não introdutor de ar.

Cada sequência de identificação dos provetes começa sempre com as letras “st” ou “ST”, estas letras servem exclusivamente para identificação dos provetes na sala de cura e ensaios. A diferença entre as letras minúsculas e maiúsculas diz respeito ao valor de consistência por espalhamento; letras minúsculas significam que foi utilizada uma quantidade de água para o valor do ensaio de espalhamento de 55% e letras maiúsculas significam que foi utilizada uma quantidade de água para o valor de 75% no mesmo ensaio.

Depois destas duas letras segue-se um número que traduz o tipo de ligante que foi usado na argamassa:

- 1 – Cal aérea
- 2 – Cal hidráulica
- 3 – Cal aérea + cimento

Imediatamente a seguir ao numero identificador do ligante vem uma letra que corresponde ao tipo de areia usada, sendo que a diferença entre maiúsculas e minúsculas tem a mesma razão que nos dois primeiros dígitos. As letras têm a seguinte correspondência:

- “a” ou “A” – Areia AGS 1/2
- “r” ou “R” – Areia de Rio
- “f” ou “F” – Areia FPS 120

O dígito seguinte à identificação da areia é um número que faz a distinção dos provetes da mesma argamassa. Para cada argamassa, os provetes prismáticos são numerados de 1 a 6 e os provetes cilíndricos de 1 a 3.

Tem-se assim completa a identificação dos provetes sem introdutor de ar. Nos provetes com introdutor de ar aparece ainda no código de identificação o símbolo “+”.

É conveniente referir que a identificação dos provetes prismáticos e cilíndricos assenta no mesmo critério com a diferença de que os cilíndricos são três de cada argamassa e os prismáticos são seis. A identificação semelhante não provoca nenhum tipo de equívocos já que a diferença de forma é inconfundível.

2.3 Determinação da baridade dos materiais

A baridade das areias e dos ligantes foi determinada com base na norma NP EN 1097-3:2002 [45] e na ficha de ensaio Fe 15 [24] do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Nova de Lisboa (UNL).

A determinação da baridade de areias e ligantes é semelhante, a única diferença reside no facto de, devido à dimensão das partículas da areia ser maior que as do ligante, é usado um recipiente com dimensões superiores para a areia. Refere-se então um único procedimento, fazendo posteriormente referência ao volume dos recipientes.



Figura 2.2 - Recipientes para determinação da baridade de areias e ligantes, respectivamente.

As areias foram colocadas numa estufa ventilada a uma temperatura de 110 °C até massa constante, ou seja, até que os valores de duas pesagens sucessivas, num intervalo de 24 horas, não diferissem mais que 0,1%¹⁸. No cálculo da baridade dos ligantes não se procedeu a secagem visto que estes se encontravam dentro de frascos condicionados desde a abertura da saca como já referido anteriormente.

As areias a ensaiar são vertidas para o recipiente respectivo através de um funil de sólidos apoiado numa superfície horizontal com um orifício. O recipiente é colocado para que o seu aro se encontre a 50 mm do bordo inferior do funil. Quando o recipiente estiver saturado de areia, formando um cone no seu cimo, é parado o escoamento. De seguida é rasado o material com uma régua metálica plana de forma lenta e com movimentos de serra para que a superfície do material fique toda ao nível dos bordos do recipiente e com o cuidado de não a compactar.

O procedimento no caso dos ligantes é igual sendo que, na fase de enchimento do respectivo recipiente, a distância entre o aro do recipiente e o bordo do funil foi aproximadamente 40 mm.

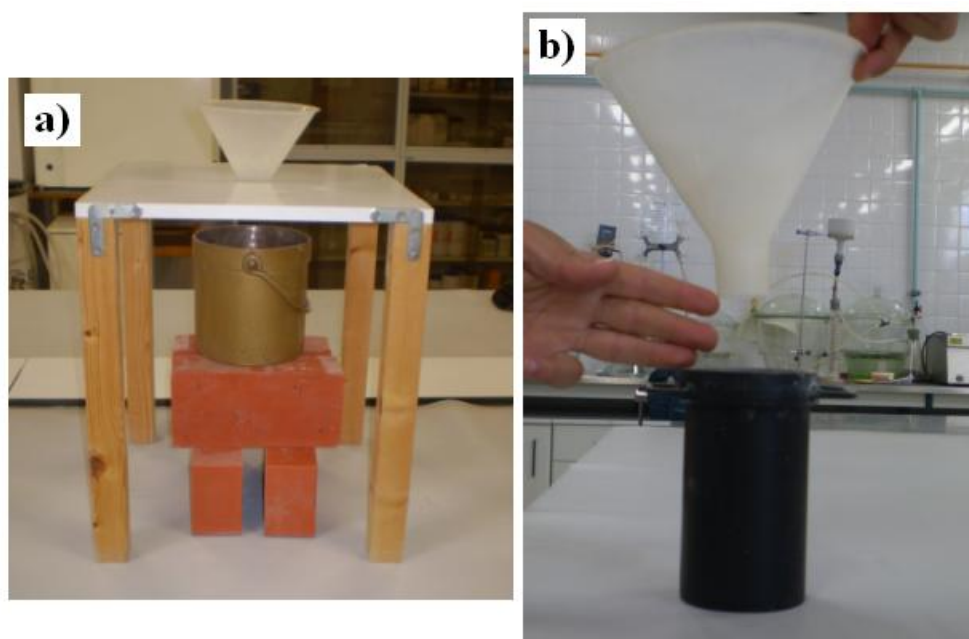


Figura 2.3 – Ensaio de baridade: a) areias; b) ligantes

¹⁸ - Quando, no seguimento do texto, se fizer referência a “massa constante” esta é a definição aplicada.

No processo de enchimento dos recipientes o material deve descer de uma forma gradual e a velocidade constante.

O recipiente preenchido é pesado numa balança com precisão de 0,1 g. A massa do recipiente foi previamente registada na balança, m é a diferença de massa entre o recipiente cheio e vazio. O valor da baridade foi calculado de acordo com a expressão:

$$Ba = \frac{m}{V} \quad [g/cm^3] \quad (2.1)$$

em que:

m : massa da amostra de areia [g]

V : capacidade do recipiente [cm^3]

Foram determinadas para cada areia e cada ligante três medições de baridade.

A capacidade dos recipientes foi determinada de acordo com a ficha de ensaio Fe 15 do DEC/UNL [24]. O recipiente foi totalmente preenchido com água (com medição de temperatura desta, t_a) e tapado com uma placa acrílica de modo a que não existissem bolhas de ar entre a superfície da água e da placa. O conjunto foi pesado numa balança com precisão de 0,1 g. A massa do recipiente e da chapa foi previamente determinada. A capacidade V foi calculada através da expressão:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad [cm^3] \quad (2.2)$$

em que:

m : massa da água [g]

ρ : massa volúmica da água à temperatura t_a [g/cm^3]

O valor da massa volúmica presente na expressão é dado segundo a ficha de ensaio Fe 15 do DEC/UNL [24] em função da temperatura a que se encontra a água.

Os volumes dos recipientes usados (média de três medições) são apresentados no quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Volumes dos recipientes dos ensaios de baridade de areias e ligantes

Recipientes	Volume [cm ³]
Areias	3022
Ligantes	488,1

2.4 Execução de argamassas

O procedimento geral usado na execução das argamassas foi baseado nas indicações da ficha de ensaio Fe 19 (DEC/UNL) [23] e da norma europeia EN 1015-2:1998 [47].

O procedimento de execução das argamassas foi organizado em várias fases. A primeira foi uma fase de testes em que, com um volume de material sólido de 800 cm³ (sendo que na fase definitiva o volume é 2600 cm³), se determinou, de forma aproximada, a quantidade de água necessária para cada valor de espalhamento pretendido (55% e 75%). Este teste teve a diferença de a água ser junta na mistura com a misturadora em funcionamento. Com base na argamassa de teste fez-se uma extrapolação para saber a quantidade de água a usar na amassadura final.

As areias foram colocadas numa estufa ventilada a uma temperatura de 110 °C até massa constante e posteriormente retiradas até atingirem a temperatura ambiente.

Os ligantes encontravam-se armazenados em frascos plásticos selados numa sala climatizada com condições ambientais de 20±2 °C de temperatura e 65±5% de humidade relativa. Num tabuleiro colocou-se a quantidade de ligante e seguidamente a quantidade de areia, ambos previamente determinados. A massa destes componentes foi medida numa balança de precisão de 0,1 g depois de se terem convertido os traços volumétricos em traços ponderais, usando para esse procedimento as baridades anteriormente calculadas. A areia e os ligantes foram cuidadosamente misturados a seco com uma colher de pedreiro.

A água foi vertida para a cuba na quantidade previamente extrapolada pela amassadura de teste. A mistura de ligante e areia foi vertida para a cuba já com a água ficando todos os componentes em contacto. O processo de mistura mecânica foi realizado com uma pá que efectuou movimentos de rotação axial e planetário. A mistura teve um período inicial de 45 s, seguidamente uma paragem de 30 s de forma a remover o material aderente à pá e às paredes da cuba e finalmente uma mistura durante 90 s.

Após a mistura dos componentes, foi determinado o respectivo valor do espalhamento segundo o processo descrito em 2.5. Foram preenchidos os moldes e compactadas as argamassas. Foram utilizados dois tipos de moldes:

- Prismáticos (160×40×40 mm)
- Cilíndricos (95 mm de diâmetro e 10 mm de espessura)



Figura 2.4 – Moldes usados

Os moldes cilíndricos serviram para a obtenção de provetes para determinação da difusão do vapor de água e os prismáticos para a obtenção de provetes para a realização dos restantes ensaios.

O preenchimento dos moldes prismáticos foi executado em duas fases: 1ª – preencheu-se o molde até meio acondicionando-o com uma espátula e compactou-se com 20 pancadas através de um compactador mecânico (figura 2.5). 2ª – encheu-se o molde numa capacidade acima do volume do mesmo e compactou-se com novas 20 pancadas. Depois da compactação, o excesso de argamassa na superfície dos moldes foi retirado numa operação de alisamento por meio da aresta de uma espátula metálica exercendo-se movimentos horizontais ao longo da maior dimensão dos moldes.



Figura 2.5 – Compactador mecânico

Os moldes circulares foram preenchidos numa só camada. O material foi compactado com uma colher de pedreiro de pequenas dimensões e foi realizada pressão com a face da colher até o molde se encontrar totalmente preenchido; o excesso de argamassa foi retirado num processo semelhante ao dos moldes prismáticos mas com a mesma colher de pedreiro com pequenas dimensões.

Depois de prontos, os provetes de argamassa fresca são levados para a sala de cura.

2.5 Argamassas frescas: consistência por espalhamento

Os ensaios de consistência por espalhamento foram realizados segundo a ficha de ensaio Fe 25 (DEC/UNL) [21] e norma EN 1015-3:1999 [48].

Com a argamassa já misturada na cuba, esta foi levada para a mesa da consistência por espalhamento. Depois de homogeneizado na cuba, o material foi colocado no interior de um molde tronco-cônico no centro da mesa de consistência por espalhamento; preencheu-se metade e compactou-se com um varão metálico, seguidamente preencheu-se completamente, repetiu-se a operação com o varão e rasou-se. O molde foi retirado cuidadosamente na vertical e foi limpa a água em volta da argamassa que por vezes existia. Com a argamassa no centro da mesa de espalhamento, foram provocadas,

através da manivela da mesa, 15 pancadas em 15 segundos. Com uma craveira, mediram-se os afastamentos d' [cm] entre os pontos opostos da linha de contorno da argamassa segundo quatro eixos marcados na mesa.

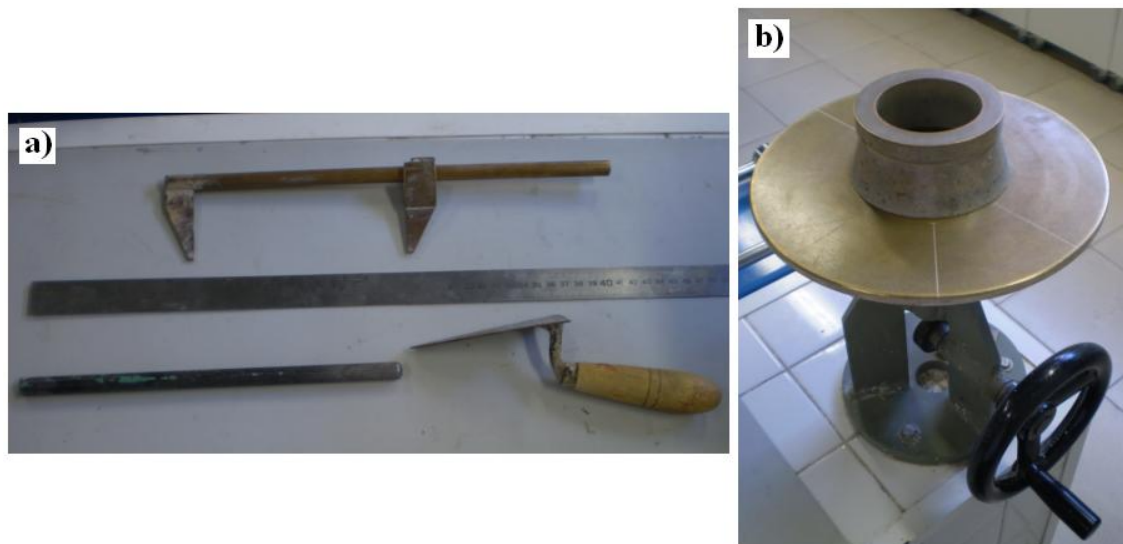


Figura 2.6 – a) régua e craveira usadas na medição do espalhamento, varão metálico e colher de pedreiro; b) mesa de consistência por espalhamento e molde tronco-cônico

O valor do espalhamento foi obtido através da expressão seguinte:

$$\text{Espalhamento} = \frac{d - 10}{10} \times 100 \quad [\%] \quad (2.3)$$

em que:

d : média dos quatro valores de d'

“10”: diâmetro interior da base do molde tronco-cônico em cm

O procedimento anterior foi realizado 3 vezes para cada argamassa. Após cada ensaio, a argamassa foi retirada da mesa e o conteúdo da cuba foi homogeneizado com uma colher de pedreiro de dimensões reduzidas antes de ser retirada a quantidade de argamassa para o ensaio seguinte.

2.6 Condições de cura

Com a moldagem concluída, os provetes foram levados para uma sala climatizada com temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $65\pm 5\%$. Após um período de 7 dias nos moldes procedeu-se à desmoldagem destes prosseguindo a sua cura na sala climatizada apoiados cada um em 2 suportes plásticos segundo uma das faces maiores.

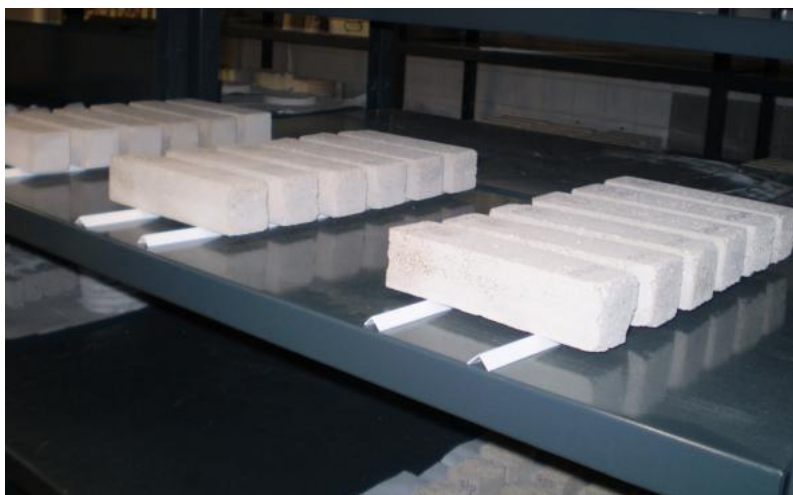


Figura 2.7 – Provetes na sala climatizada

O tempo de cura das argamassas é semelhante excluindo as argamassas cujo ligante é a cal aérea. Estas argamassas tiveram um tempo maior de cura devido ao seu processo de endurecimento ser mais lento. Os tempos de cura de todas as argamassas encontram-se descritos no quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Tempos de cura das argamassas

Argamassas			Cura (dias)
Ligante	Areia	Introdutor de ar	
Cal aérea	AGS 1/2	-	91
	Rio	-	91
	FPS 120	-	90
Cal hidráulica	AGS 1/2	-	62
	Rio	-	61
	FPS 120	-	61
Cal aérea + cimento	AGS 1/2	-	61
	Rio	-	62
	FPS 120	-	61
Cal aérea	Rio	✓	61
Cal hidráulica		✓	61
Cal aérea + cimento		✓	61

Terminado o seu tempo de cura, os provetes foram transferidos da sala climatizada para uma estufa com temperatura a 60 °C. Após atingirem uma massa constante começaram a ser realizados os ensaios.

2.7 Argamassas endurecidas

2.7.1 Obtenção de provetes

Cada argamassa realizada deu origem a seis provetes prismáticos e três cilíndricos como já foi anteriormente referido. Os provetes circulares destinaram-se exclusivamente ao ensaio de difusão do vapor de água. Os provetes prismáticos, destinados por vezes a ensaios destrutivos, deram origem a provetes usados nos ensaios seguintes. O esquema da metodologia da obtenção dos provetes encontra-se na figura 2.8.

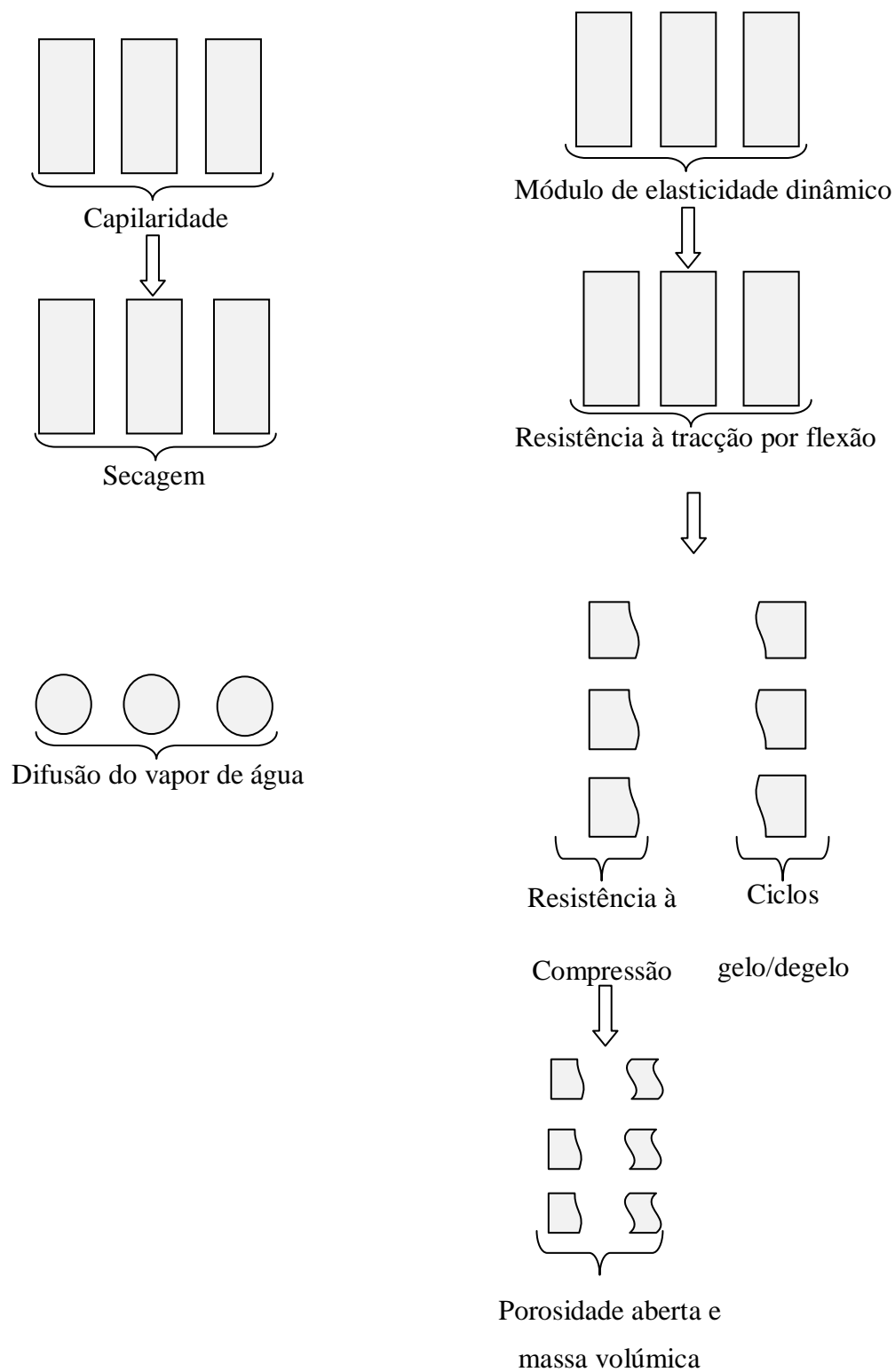


Figura 2.8 – Obtenção dos provetes

2.7.2 Difusão do vapor de água

O ensaio de difusão do vapor de água foi realizado de acordo com as indicações da ficha de ensaio Fe 05 (DEC/UNL) [27]. Foi utilizado o método da cápsula húmida.

Os provetes foram inicialmente condicionados numa estufa a uma temperatura de 60 ± 5 °C de modo a secarem até atingirem massa constante. Depois de atingida massa constante, foram retirados da estufa de modo a atingirem a temperatura ambiente. A pesagem a temperatura ambiente constitui o valor da sua massa seca.

O ensaio preconiza a colocação dos provetes em cápsulas metálicas. No fundo do interior das cápsulas colocou-se 1 cm de água, posteriormente embebida com uma pequena quantidade de algodão para evitar que alguns salpicos atingissem o provete no manuseamento da cápsula. O provete foi colocado na parte superior da cápsula concebida especialmente para o seu encaixe. Com um anel metálico e um lápis foi marcado o diâmetro da cápsula abaixo do qual o provete se encontra. Seguidamente selou-se o espaço lateral entre o provete e a cápsula aplicando silicone até ao limite marcado anteriormente. Esta zona lateral entre o provete e a cápsula passa a ser impermeável ao vapor de água. A área de ensaio, constituída pela parte central do provete, tem um valor de $0,00442 \text{ m}^2$.

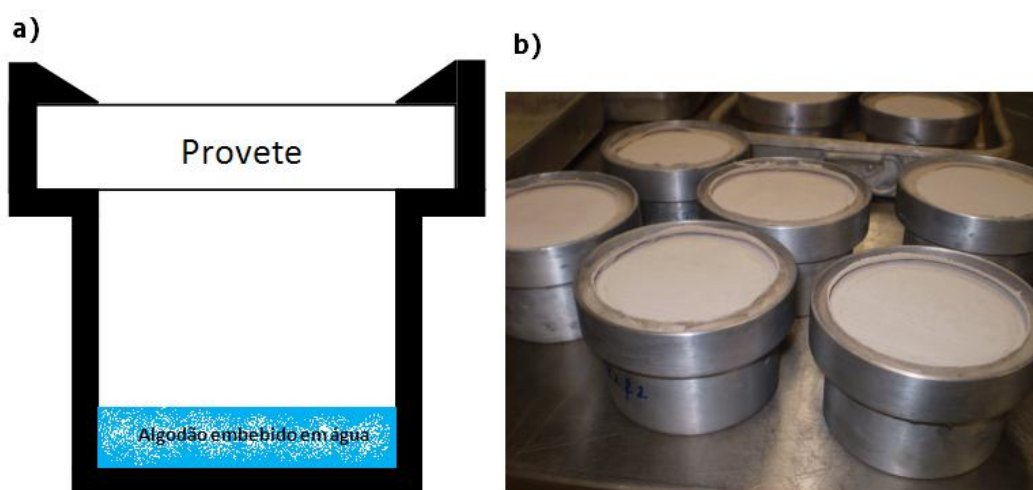


Figura 2.9 – a) Esquema de condicionamento do provete na cápsula; b) Provetes preparados nas cápsulas

Depois da preparação das cápsulas é pesado cada conjunto (cápsula+provete) e são todos colocados numa câmara climática com temperatura de 20 °C e humidade relativa de 40%. Foram realizadas pesagens de cada conjunto numa frequência diária de modo a determinar-se a quantidade de vapor de água difundido. As pesagens diárias foram realizadas até que se estabelecesse um regime estacionário de difusão de vapor de água de modo a que as diferenças de fluxo fossem inferiores a 5%:

$$\frac{\frac{\Delta m_i}{t_i} - \frac{\Delta m_{i-1}}{t_{i-1}}}{\frac{\Delta m_i}{t_i}} \times 100 \leq 5\% \quad (2.4)$$

em que:

Δm_i : diferença das massas determinadas nos limites do intervalo de tempo t_i

Δm_{i-1} : diferença das massas determinadas nos limites do intervalo t_{i-1}

O fluxo de vapor G por unidade de tempo foi obtido a partir da média das diferenças de massa por unidade de tempo (em g/h), com 3 valores obtidos em regime estacionário. O coeficiente de difusão do vapor de água π foi calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$\pi = \frac{G \cdot e}{S \cdot \Delta P \cdot 36 \times 10^5} \quad [Kg/m.s.Pa] \quad (2.5)$$

em que:

e : espessura do provete [m]

S : área de ensaio do provete [m^2]

ΔP : diferencial de pressão do vapor de água entre os dois lados do provete [Pa]

O diferencial de pressão ΔP foi calculado através da expressão:

$$\Delta P = P_e - P_i = P_s \times \frac{Hr_e}{100} - P_s \times \frac{Hr_i}{100} \quad [Pa] \quad (2.6)$$

em que:

P_e : pressão de vapor existente no ambiente da câmara climática [Pa]

P_i : pressão de vapor existente no interior da cápsula [Pa]

P_s : pressão de vapor de saturação para o valor de temperatura verificado no interior da câmara climática (valor tabelado) [Pa]

Hr_e : humidade relativa no interior da câmara climática [40%]

Hr_i : humidade relativa no interior da cápsula [100%]

2.7.3 Absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados segundo a ficha de ensaio Fe 06 (DEC/UNL) [25].

O sistema de ensaio incluiu um recipiente estanque de plástico, no fundo do qual se verteu uma quantidade de água suficiente de modo a criar condições de saturação. No interior do recipiente foi colocado um tabuleiro metálico apoiado sobre 4 suportes com 15 cm de altura de forma a não contactar com a água existente no fundo. O tabuleiro continha uma lâmina de água com 2 mm de espessura e uma camada de papel absorvente sobre todo o seu fundo. Ao longo do ensaio tentou-se manter esta quantidade de água, repondo-a sempre que baixava o nível. Durante a noite foi impossível repor a água absorvida pelo que, ao fim do dia, era colocada uma quantidade de água ligeiramente superior para que à noite o ensaio tivesse a menor alteração possível ao nível da absorção.

Os provetes foram retirados da estufa onde se encontravam a uma temperatura de 60 ± 5 °C para a sala climatizada onde decorreu a cura, esta com temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $65 \pm 5\%$ para arrefecerem e para a sua temperatura atingir a temperatura ambiente.

Com os provetes à temperatura ambiente procedeu-se à pesagem de cada provete seco com uma balança de precisão 0,001 g. Os provetes foram colocados no tabuleiro, sobre o papel absorvente, apoiados numa das faces de menor área (na vertical). Com todos os provetes a ensaiar dentro da caixa foi colocada a tampa para que não existisse evaporação. O tempo de referência correspondeu ao momento em que os provetes foram colocados no tabuleiro. Foram efectuadas pesagens aos 5, 10, 15, 30, 60 e 180 minutos e posteriormente a cada 24 horas.

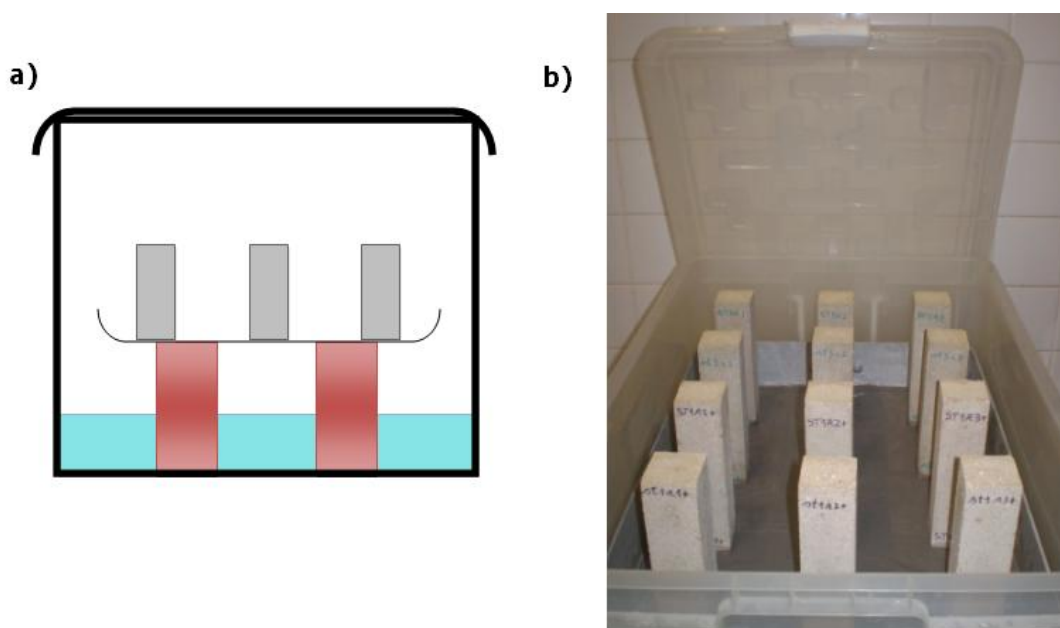


Figura 2.10 – a) Esquema de montagem do ensaio de absorção de água por capilaridade (vista em corte);
b) Disposição dos provetes no ensaio de absorção de água por capilaridade

Para cada uma das determinações de massa feitas foi calculado o valor da quantidade de água absorvida m_i pela expressão:

$$m_i = \frac{m_2 - m_1}{S} \quad [kg/m^2] \quad (2.7)$$

em que:

m_1 : massa do provete seco [kg]

m_2 : massa do provete após decorrido o intervalo de tempo correspondente [kg]

S: área da face em contacto com a água [m^2]

Com os valores obtidos, traçou-se um gráfico com abcissas relativas a valores de tempo expressas em \sqrt{t} (em segundos) e ordenadas relativas a quantidades de água absorvida expressas em kg/m^2 ; são obtidas normalmente curvas cujo troço inicial é um segmento de recta que passa pela origem. O coeficiente de absorção de água por capilaridade, expresso em $\text{kg/m}^2.\text{s}^{0.5}$, corresponde ao coeficiente angular do troço inicial das curvas traçadas e foi obtido considerando os primeiros 60 minutos de ensaio. Para além deste valor, determinou-se também o valor assintótico das curvas de absorção, que se considerou atingido quando a diferença entre dois valores sucessivos, m_i e m_{i-1} , foi menor que 1%. O ensaio considerou-se terminado quando se chegou a este valor de m_i .

2.7.4 Secagem

Os ensaios de secagem realizados seguiram as indicações de três documentos: a ficha de ensaio Fe 07 [29] (DEC/UNL), A tese de Doutoramento da Professora Doutora Ana Paula Pinto [65] sobre conservação de pedra (IST) e um documento sobre absorção e secagem elaborado pela Professora Doutora A. E. Charola [10].

O ensaio de secagem decorreu depois de terminado o ensaio de absorção de água por capilaridade. Os provetes foram imersos em água até atingirem massa constante. O ensaio decorreu na mesma sala climatizada do ensaio de absorção de água por capilaridade com temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $65\pm 5\%$.

O sistema de ensaio é um recipiente em plástico com uma rede no fundo de modo a suportar os provetes na vertical e a facilitar a secagem na face em que são apoiados. Foi montada uma protecção em cartão cobrindo todo o recipiente mas deixando aberturas da parte traseira. A razão da utilização desta cobertura prende-se ao facto do dispositivo de climatização fazer uma considerável deslocação de ar, e assim, ao mesmo tempo que se garantiam as condições da sala climatizada, reduzia-se o efeito do deslocamento do ar.

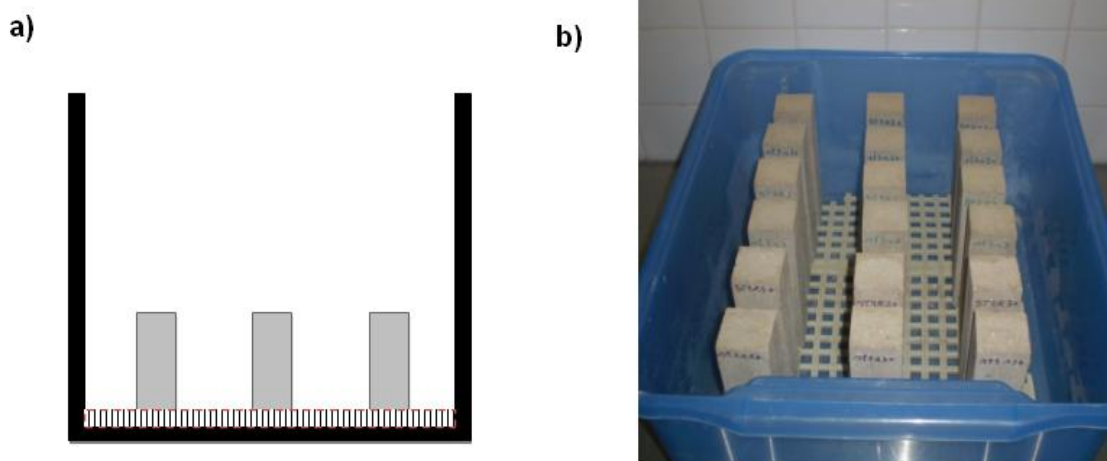


Figura 2.11 – a) Esquema de montagem do ensaio de secagem (vista em corte); b) Vista do ensaio de secagem.

Num suporte plano foram colocados os provetes saturados, saídos da imersão em água, e foram envolvidos por uma toalha bastante molhada para que no trajecto e tempo até início do ensaio continuassem saturados e, em simultâneo, se removesse a película de água superficial. Os provetes foram pesados um a um numa balança de precisão de 0,001 g e colocados dentro da caixa do ensaio. Foi activado um cronómetro no momento em que o primeiro provete foi colocado na caixa de modo a temporizar os intervalos de tempo de medição de massa. Foram efectuadas medições de massa aos 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180 e 300 minutos. As medições seguintes foram feitas diariamente uma ou duas vezes por dia se possível. O ensaio é terminado quando se atinge o valor assintótico de secagem.

O índice de secagem (IS) de cada provete foi determinado a partir da expressão:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=ns} [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} - Q_i}{2}]}{Q_{max} \times t_f} \quad (2.8)$$

em que:

Q_i : quantidade de água no interior do provete no instante “i”, expressa em percentagem relativamente à massa seca

Q_{max} : quantidade de água inicial, expressa em percentagem relativamente à massa seca

t_f : tempo final de ensaio, em horas

t_i : tempo de ensaio “i”, em horas

ns: número de pesagens de controlo efectuadas

2.7.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico seguiram as instruções da ficha de ensaio Fe 08 [30] (DEC/UNL). O processo baseou-se na medição da frequência de ressonância longitudinal de cada provete de ensaio, utilizando um equipamento que emite vibrações e regista a correspondente frequência de ressonância.

Os provetes foram condicionados numa estufa ventilada à temperatura de 60 ± 5 °C até massa constante, seguidamente foram retirados e deixados arrefecer até à temperatura ambiente.

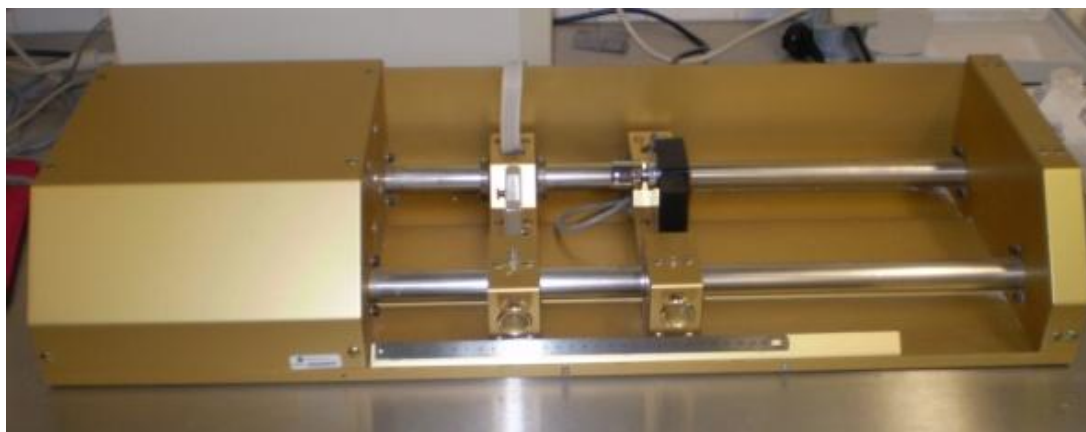


Figura 2.12 - Equipamento de medição do módulo de elasticidade dinâmico

Foi colocado cada provete sobre o suporte do equipamento de ensaio de forma a que uma das extremidades ficasse em contacto com o vibrador (fonte emissora) e a outra extremidade a cerca de 1 mm da unidade receptora. O equipamento registou as amplitudes das vibrações correspondentes ao intervalo de frequência transmitido ao

vibrador por um oscilador de frequência variável. As condições de ressonância relacionam-se com as amplitudes máximas. A frequência de ressonância fundamental longitudinal corresponde à frequência mais baixa para a qual se obtém uma amplitude máxima. O programa informático, ao ser introduzida a massa do provete, processa os dados recebidos do equipamento e calcula automaticamente o módulo de elasticidade E pela expressão:

$$E = (2lf_0)^2 \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad [MPa] \quad (2.9)$$

em que:

l : comprimento do provete [m]

f_0 : frequência de ressonância longitudinal [Hz]

ρ : massa volúmica do material [N/m^3]

g : aceleração da gravidade [$9,81 \text{ m/s}^2$]

O procedimento de medição foi efectuado duas vezes. Depois de efectuada a primeira medição foram trocadas as faces dos provetes correspondentes à emissão e à recepção e ainda rodado uma face sob o eixo longitudinal (figura 2.13). O valor do módulo de elasticidade dinâmico foi o resultado da média das duas medições.



Figura 2.13 – Posições adoptadas nas medições do módulo de elasticidade dinâmico

2.7.6 Resistência à tracção por flexão

Os ensaios de resistência à tracção por flexão foram baseados na ficha de ensaio Fe 27 [22] (DEC/UNL).

Os provetes foram condicionados numa estufa ventilada à temperatura de 60 ± 5 °C até massa constante, sendo posteriormente retirados para que, no momento do ensaio, estivessem à temperatura ambiente. O sistema de ensaio consiste numa máquina universal de tracção ligada a um computador com o respectivo software para o ensaio. A máquina foi equipada com uma célula de carga de 50 kN, um suporte metálico com dois apoios distanciados de 100 mm equidistantes do local onde é aplicada a força e uma peça metálica que incide a meio vão do provete a qual é a transmissora de carga.



Figura 2.14 – a) Ensaio de resistência à tracção por flexão

Depois da definição no software informático das posições de início de ensaio e fim de ensaio, foi escolhida a aplicação de carga a uma velocidade de 5,1 mm/min, até à rotura. O valor da pré-carga foi de 10 N. A pré-carga serve para a estrutura do provete dar uma resposta ao carregamento que está a ser aplicado, reajustando as partículas no seu interior. No final do ensaio o provete ficou dividido em duas partes, tendo sido separado na zona onde foi aplicada a carga. O valor da resistência à flexão R_f foi calculado pela expressão:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad [MPa] \quad (2.10)$$

em que:

F_f : força de flexão correspondente à rotura [N]

l: distância entre apoios [mm]

b: lado da secção quadrada do provete [mm]

2.7.7 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão seguiram as indicações da ficha de ensaio Fe 27 [22] (DEC/UNL). Os provetes tiveram o mesmo condicionamento em estufa e o mesmo tratamento que no ensaio de resistência à tracção por flexão. Os provetes usados neste ensaio foram os meios prismas resultantes da determinação da resistência à tracção por flexão.

A máquina de ensaio é a mesma que a utilizada no ensaio anterior. O ensaio de compressão foi realizado a uma velocidade de 5,25 mm/min até à rotura, com controlo de deslocamento. O valor da pré-carga foi de 20 N. Os provetes foram colocados sobre um dispositivo específico com o objectivo de garantir uma área de actuação de cargas de 1600 mm².

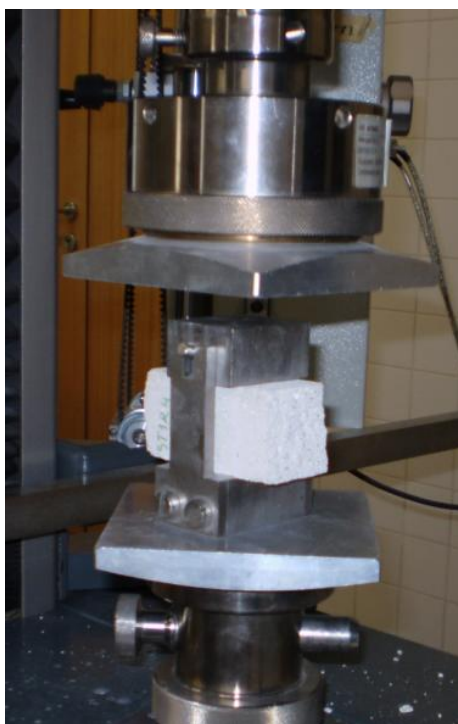


Figura 2.15 - Ensaio de resistência à compressão

O valor da resistência à compressão R_c foi calculado pela expressão:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad [MPa] \quad (2.11)$$

em que:

F_c : força de compressão correspondente à rotura [N]

A: área de contacto [mm^2]

2.7.8 Porosidade aberta e massa volúmica aparente

Os ensaios de porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas foram determinados segundo as indicações da ficha de ensaio Fe 02 [28] e Fe 01 [26] (DEC/UNL), respectivamente. Os procedimentos de ensaio foram comuns, tendo variado apenas a expressão segundo a qual se calcularam os resultados que, em ambos os casos, se baseou no método da pesagem hidrostática. Os provetes foram condicionados numa estufa ventilada a uma temperatura de 60 ± 5 °C até massa constante e posteriormente retirados até atingirem a temperatura ambiente. Os provetes usados foram os que resultaram dos ensaios de resistência à compressão.

Os provetes foram pesados numa balança de precisão 0,001 g e colocados num exsiccador cuja pressão foi diminuída até ao valor de 2667 Pa. Após decorridas 24 horas, fez-se com que no exsiccador penetrasse lentamente a quantidade de água necessária para a total imersão dos provetes, mantendo-se a pressão referida por mais 24 horas. Os provetes foram posteriormente mantidos imersos no exsiccador, à pressão atmosférica, durante um novo período de 24 horas. Após este tempo, foram pesados em imersão; seguidamente foi enxugada a sua superfície com um pano húmido e pesados de novo no prato superior da balança. A água usada foi da rede pública.

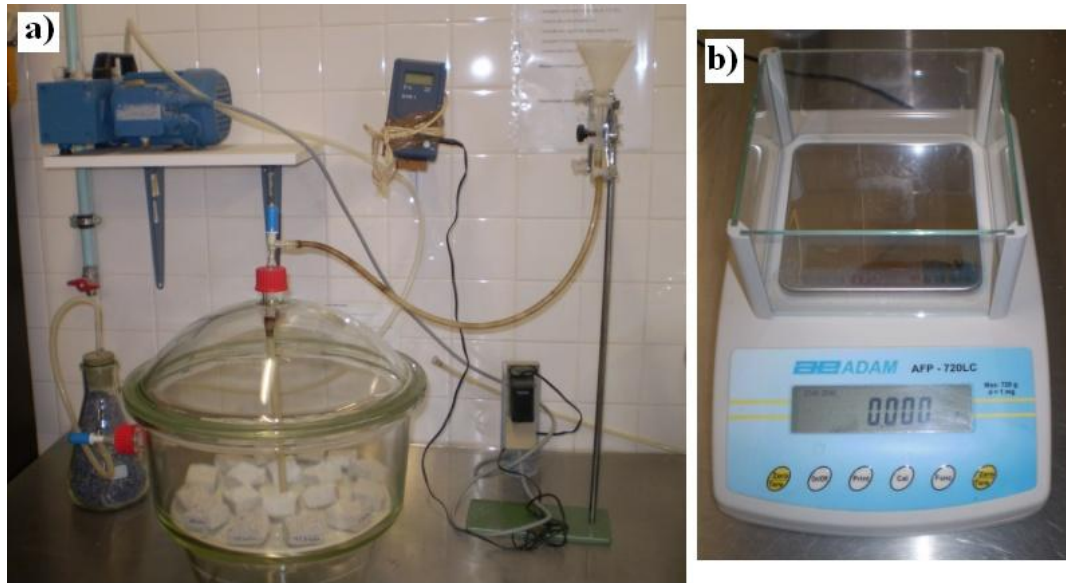


Figura 2.16 - a) Ensaio de determinação da porosidade e massa volúmica aparente; b) Balança usada na pesagem dos provetes

Os valores da porosidade aberta P_{ab} e da massa volúmica aparente M_{vol} foram determinados de acordo com as seguintes expressões, respectivamente:

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \quad [\%] \quad (2.12)$$

$$M_{vol} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3 \quad [kg/m^3] \quad (2.13)$$

em que:

m_1 : massa do provete seco [g]

m_2 : massa do provete saturado imerso [g]

m_3 : massa do provete saturado [g]

2.7.9 Ciclos gelo/degelo

Os ensaios de resistência aos ciclos gelo/degelo em argamassas de cal não são abordados em nenhum documento normativo. As únicas normas existentes dizem respeito a métodos de ensaio para determinação da resistência aos ciclos gelo/degelo para betão e para pedra natural. Estes procedimentos foram considerados como muito agressivos, principalmente devido ao facto de a cada ciclo se proceder à imersão dos provetes. Foi adoptado um método de ensaio diferente e original que teve como objectivo aferir a perda de massa dos provetes, bem como fazer uma avaliação qualitativa dos danos ao longo do tempo.

Os provetes foram imersos em água até atingirem massa constante. A câmara climática simuladora dos ciclos gelo degelo foi programada para que efectuasse dois ciclos por dia com temperatura máxima e mínima de 10 e -10 °C respectivamente. A figura 2.17 mostra a variação de temperatura em relação ao tempo em um ciclo.

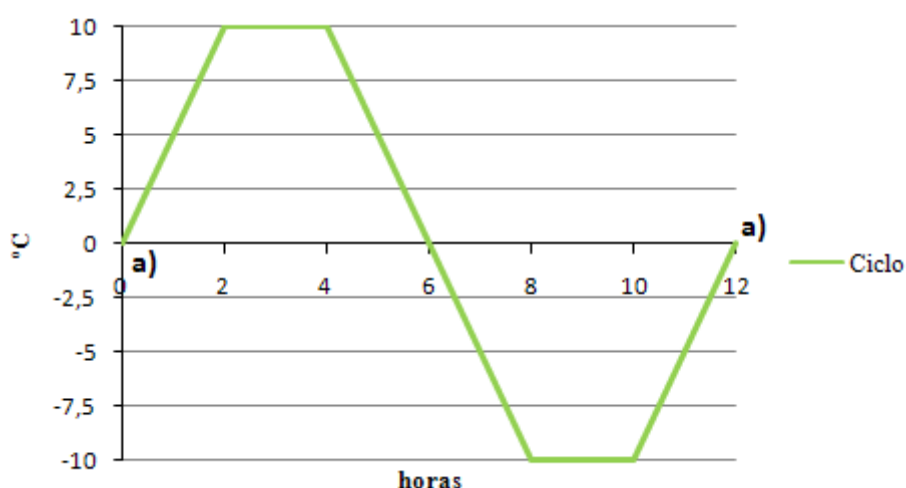


Figura 2.17 – Variação da temperatura com o tempo em um ciclo

Os provetes foram retirados da imersão, enxugados com um pano húmido e a sua massa foi medida numa balança de precisão 0,001 g. Seguidamente cada um dos provetes foi colocado dentro de um saco de plástico com duplo fecho hermético de modo a conservar as suas condições de humidade e a armazenar algum material que se separasse do provete. Os provetes foram pesados a cada 24 horas, no final das duas horas em que a temperatura subia (ponto a) da figura 2.17). A cada pesagem, e sempre

que se verificava uma alteração visível, foi efectuado o registo fotográfico de modo a posteriormente se juntar uma análise qualitativa à quantitativa realizada.

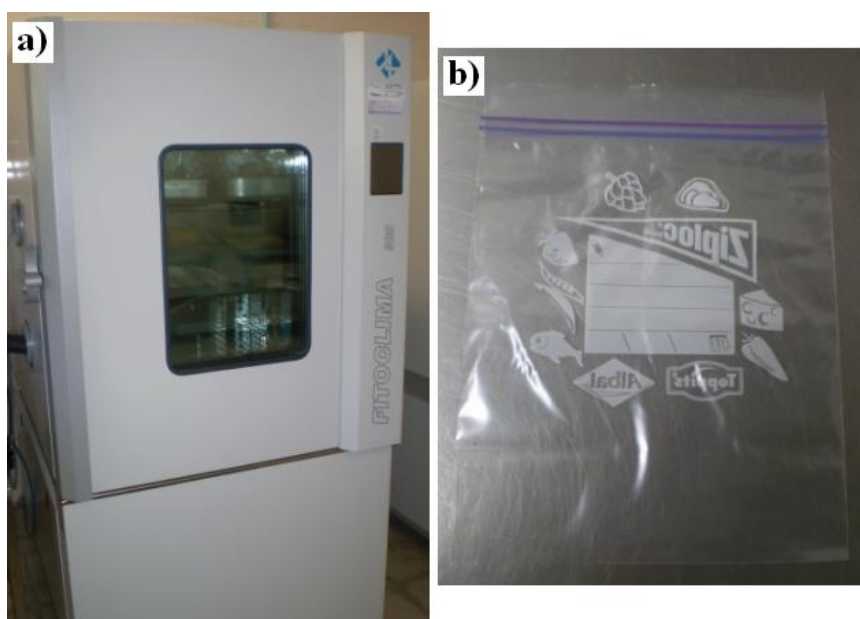


Figura 2.18 - a) câmara climática simuladora dos ciclos gelo degelo; b) saco de plástico com duplo fecho hermético

As pesagens foram terminadas no momento para o qual se aferiu uma desintegração extrema¹⁹ nos provetes para cada uma das argamassas sendo que foi estabelecido um limite máximo de 40 ciclos.

Para cada argamassa foram estabelecidos três índices comparativos i_n ²⁰ correspondentes à percentagem de massa perdida aos 10 (i_{10}), 20 (i_{20}) e 40 ciclos (i_{40}).

$$i_n = \frac{m_0 - m_n}{m_n} \times 100 \quad [\%] \quad (2.14)$$

em que:

m_0 : massa inicial do provete na entrada para a câmara climática

m_n : massa do provete com n ciclos

¹⁹ - Esta desintegração extrema corresponde a uma percentagem de perda de massa dos provetes maior ou igual a 30% da massa inicial.

²⁰ - Os índices comparativos são usados na comparação de características e/ou comportamentos das argamassas.

3. Apresentação e análise prévia de resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pelas argamassas nos ensaios definidos no plano de ensaios. A sua apresentação é feita sob a forma de gráficos e tabelas.

Para além da apresentação, foi realizada também uma análise prévia dos resultados. A análise prévia dos resultados permitiu o estabelecimento de determinadas tendências de acordo com a formulação das argamassas, esta análise permite avaliar a influência dos seguintes parâmetros: tipo de areia, quantidade de água, tipo de ligante e utilização de um introdutor de ar na argamassa.

Todos os resultados apresentados, respectivos a ensaios de argamassas endurecidas (sub-capítulos 3.3 a 3.8), correspondem à média dos valores obtidos em três provetes de argamassa com a mesma composição.

3.1 Baridade de ligantes e agregados

O ensaio de baridade foi executado em todos os ligantes e agregados usados no desenvolvimento experimental. São apresentados no quadro 3.1 os valores da média e desvio padrão dos três ensaios realizados para cada material. As quantidades dos vários materiais utilizados nas argamassas foram obtidas com base na sua baridade.

Quadro 3.1 – Baridade de ligantes e agregados

	Material	Baridade [g/cm ³]
Ligantes	Cal aérea	0,361±0,007
	Cal hidráulica	0,852±0,005
	Cimento	1,045±0,007
Areias	Areia AGS 1/2	1,492±0,006
	Areia de Rio	1,445±0,005
	Areia FPS 120	1,315±0,002

3.2 Consistência por espalhamento das argamassas

No desenvolvimento experimental deste trabalho as argamassas foram concebidas de forma a obter dois tipos de espalhamento, ou seja, para cada combinação de ligante e areia, foram realizadas duas argamassas diferentes consoante a sua quantidade de água. A consistência das argamassas foi calculada através do ensaio de consistência por espalhamento. Este ensaio é bastante sensível devido ao facto da existência de vários factores que influenciem os seus valores²¹. Este facto levou a admitir-se um intervalo admissível de valores de acordo com o valor estipulado de espalhamento para as argamassas, este intervalo é demonstrado no quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Intervalos admissíveis de espalhamento das argamassas

Espalhamento	Intervalo admissível
55%	52% a 58%
75%	72% a 78%

As argamassas com introdutor de ar têm uma formulação igual às outras argamassas de composição semelhante; a diferença reside na introdução deste componente de forma a avaliar a sua influência. As quantidades de água de todas as argamassas e o correspondente valor de espalhamento encontram-se no quadro 3.3.

²¹ - Os principais factores que influenciam os valores do ensaio de consistência por espalhamento são: 1 - mistura dos vários componentes; 2 - acomodação da argamassa no molde tronco-cónico; 3 - ritmo das pancadas da mesa de espalhamento.

Quadro 3.3 – Quantidade de água e valores de espalhamento das argamassas

Argamassa	Qtd. de água [ml]	Espalhamento [%] (referência:55%)	Argamassa	Qtd. de água [ml]	Espalhamento [%] (referência:75%)
st1a	900	53%	ST1A	917	72%
st1r	910	58%	ST1R	975	76%
st1f	1000	56%	ST1F	1098	72%
st2a	634	57%	ST2A	813	73%
st2r	878	52%	ST2R	933	74%
st2f	1248	54%	ST2F	1316	77%
st3a	543	57%	ST3A	742	78%
st3r	813	57%	ST3R	845	75%
st3f	1089	55%	ST3F	1150	73%
st1r+	910	72%	ST1R+	975	97%
st2r+	878	92%	ST2R+	933	104%
st3r+	813	80%	ST3R+	845	94%

O quadro 3.3 permite tirar algumas conclusões acerca da quantidade de água em relação à consistência pretendida. A quantidade de água aumenta à medida que a granulometria da areia diminui para todas as argamassas com o mesmo ligante. Este facto explica a importância da superfície específica da areia na quantidade de água da argamassa, V. M. Rato reitera esta afirmação: “quanto mais fina for a areia, maior é a quantidade de água de amassadura necessária, o que se deve à superfície específica acrescida” [68].

O quadro permite observar, inclusivamente, o efeito do introdutor de ar na consistência das argamassas. A figura 3.1 traduz a comparação da consistência por espalhamento entre argamassas com constituições semelhantes, onde a única diferença é o uso do introdutor de ar.

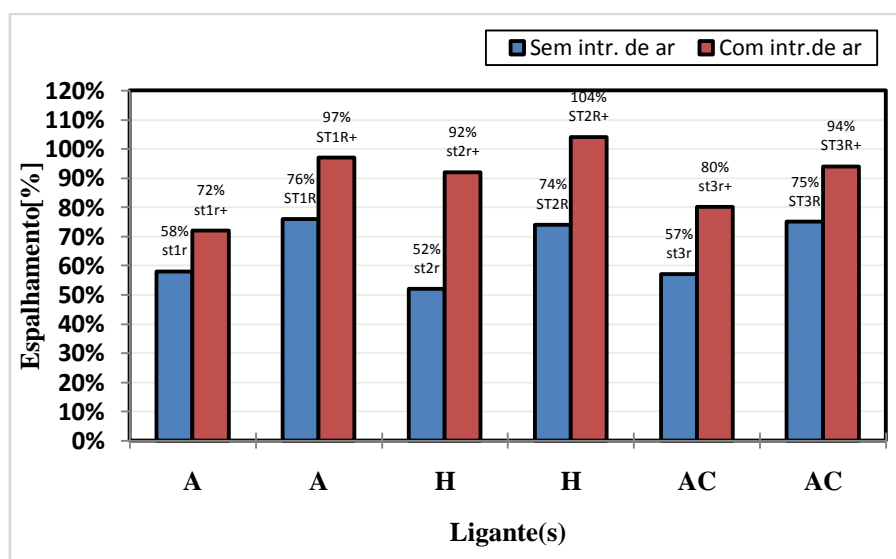


Figura 3.1 – Resultados do ensaio de consistência por espalhamento em argamassas com e sem introdutor de ar (A - Cal aérea; H - Cal Hidráulica; AC - Cal aérea + cimento)

Pela análise do gráfico, é facilmente perceptível que o introdutor de ar faz aumentar a trabalhabilidade de todas as argamassas. Este aumento não é devido à quantidade líquida acrescida do introdutor, visto que é uma quantidade insignificante em relação ao volume de água de amassadura. O aumento da trabalhabilidade, como refere *Coutinho* [15-vol. 1], é devido às propriedades do introdutor de ar. O introdutor de ar forma bolhas com um bom coeficiente de forma que reduz o atrito entre as partículas da argamassa.

3.3 Porosidade aberta e massa volúmica

O ensaio da porosidade aberta determina o volume dos poros com ligação ao exterior e os poros com comunicação com outros poros. É admitido que a porosidade aberta assume uma proporção maioritária na porosidade total da argamassa, assim, para efeitos de análise de resultados é desprezada a porosidade fechada. O conhecimento da porosidade das argamassas assume extrema importância quando o estudo é focalizado na sua durabilidade.

Durante o ensaio, desde a colocação dos provetes no interior do excicador até à imersão, o ambiente interior do excicador está sujeito a uma acção de sucção do ar provocada por

uma bomba, de modo a que o ar no interior dos poros da argamassa seja maioritariamente retirado, e seja, nestes, facilitada a entrada de água.

Os resultados do ensaio para as várias argamassas estão descritos no quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Porosidades e massas volúmicas aparentes das argamassas

Argamassa	Porosidade [%]	M.Volúmica [kg/m³]	Argamassa	Porosidade [%]	M.Volúmica [kg/m³]
st1a	31 ± 1%	1795 ± 15	ST1A	31 ± 0%	1782 ± 6
st1r	34 ± 0%	1717 ± 10	ST1R	34 ± 0%	1718 ± 5
st1f	37 ± 0%	1660 ± 7	ST1F	38 ± 0%	1632 ± 9
st2a	28 ± 0%	1898 ± 1	ST2A	29 ± 1%	1855 ± 13
st2r	32 ± 0%	1778 ± 9	ST2R	32 ± 0%	1783 ± 5
st2f	39 ± 0%	1602 ± 5	ST2F	39 ± 0%	1604 ± 6
st3a	27 ± 0%	1916 ± 13	ST3A	30 ± 1%	1856 ± 25
st3r	32 ± 0%	1797 ± 2	ST3R	30 ± 1%	1827 ± 16
st3f	37 ± 0%	1666 ± 10	ST3F	37 ± 0%	1656 ± 0
st1r+	34 ± 0%	1717 ± 2	ST1R+	35 ± 0%	1707 ± 8
st2r+	33 ± 0%	1739 ± 6	ST2R+	34 ± 0%	1734 ± 5
st3r+	33 ± 0%	1785 ± 33	ST3R+	32 ± 0%	1786 ± 6

A figura 3.2, apresenta graficamente os resultados do ensaio de porosidade aberta nas argamassas sem introdutor de ar. Estes resultados estão organizados por argamassas com o mesmo tipo de ligante, variando o tipo de areia e a quantidade de água. A massa volúmica é expressa como função directa da porosidade aberta, sendo assim, é estudada apenas esta última.

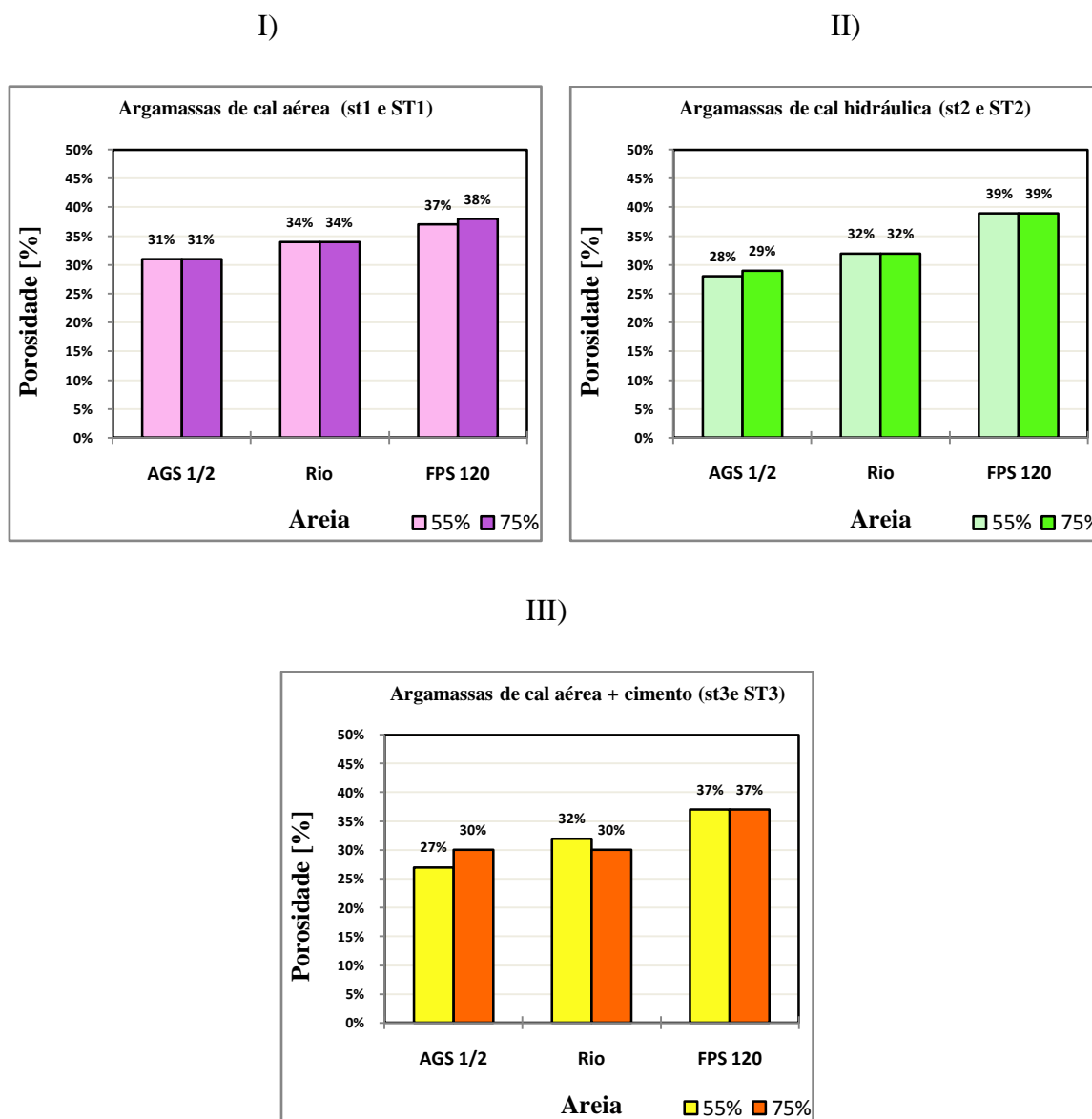


Figura 3.2 – Porosidades das argamassas. I) Argamassas de cal aérea; II) Argamassas de cal hidráulica; III) Argamassas de cal aérea + cimento

Pelas representações gráficas I), II) e III) é possível visualizar que as argamassas de cal aérea + cimento são as que apresentam menores valores de porosidade aberta. Este resultado está de acordo com observações de Mosquera *et al* [60] que afirma que, à medida que aumenta a quantidade de cimento numa argamassa de cal aérea + cimento, verifica-se a diminuição da porosidade. As argamassas de cal hidráulica apresentam um comportamento intermédio, comportamento esse também confirmado no mesmo estudo. Apesar das diferenças verificadas, os valores de porosidade dos diferentes tipos de ligante com a mesma areia são muito semelhantes.

A porosidade aumenta com a diminuição da granulometria da areia, o que se deve à maior superfície específica de areias com partículas de menores dimensões.

Os resultados do ensaio, relativamente às comparações entre as quantidades de água usadas nas argamassas, não são claramente conclusivos. Existe uma tendência de manutenção ou ligeiro aumento da porosidade com o aumento de água na argamassa, mas este aumento é muito ténue para se tirarem ilações conclusivas. A exceção a este comportamento verifica-se na argamassa de cal aérea + cimento com areia de rio, onde a porosidade baixa com o aumento de água. Este resultado pensa-se que seja fortuito, dado que o comportamento com as outras areias é contrário; por outro lado, esta tendência não encontra paralelo em qualquer trabalho já publicado.

De acordo com a investigação publicada, eram esperados valores maiores de porosidade nas argamassas com maior quantidade de água. A explicação para este facto pode residir em duas causas: a) a reduzida dimensão e grande fragilidade dos provetes (sujeitos anteriormente a dois ensaios destrutivos) ter interferência no encurtamento de diferenças; b) a influência da operação de compactação. Esta explicação é a que parece fazer mais sentido. Coutinho [15-vol. 2] refere que a operação de compactação reduz a porosidade das argamassas. No caso deste trabalho experimental, esta operação pode ter reduzido a porosidade das duas argamassas para valores próximos, uniformizando-os.

A figura 3.3 traduz a comparação dos valores de porosidade de argamassas com e sem introdutor de ar.

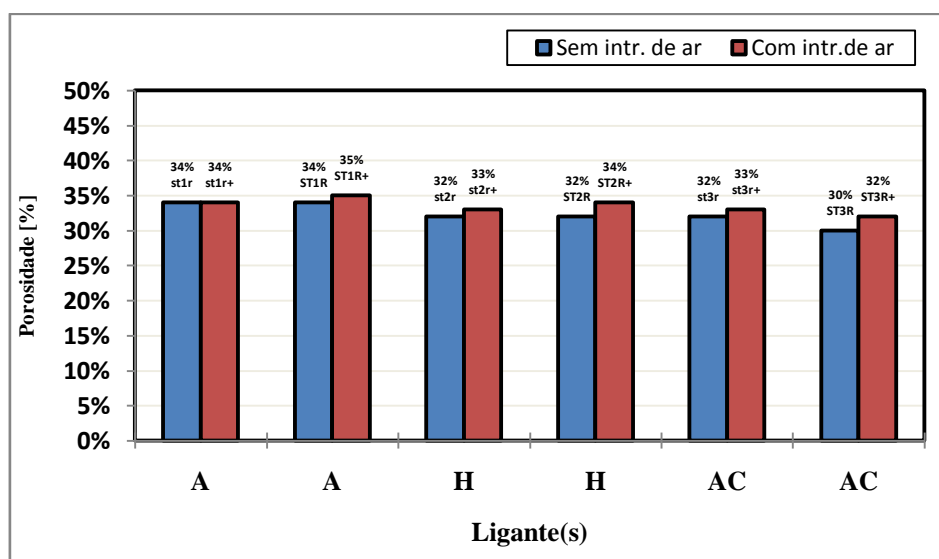


Figura 3.3 – Comparação dos valores de porosidade de argamassas com e sem introdutor de ar. A – cal aérea; H – cal hidráulica; AC – cal aérea + cimento

É verificado através da figura que a utilização do introdutor de ar nas argamassas faz aumentar a sua porosidade. Apesar da análise anterior, referindo a compactação como uniformizadora da porosidade, eram esperadas maiores diferenças de porosidade comparando argamassas com e sem introdutor de ar. O introdutor de ar parece não fazer o efeito esperado neste tipo de argamassas.

3.4 Resistências mecânicas

As resistências mecânicas são, de todos os factores que influenciam a durabilidade das argamassas, um dos mais importantes. Por esta razão, na maioria dos trabalhos de investigação são referidas estas características na caracterização das argamassas. Neste trabalho de investigação, e no que corresponde aos ensaios de resistências mecânicas, é realizado o ensaio de resistência à tracção por flexão e, seguidamente, já com as metades de provetes provenientes deste, é realizado o ensaio de resistência à compressão. É também realizado o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico. O módulo de elasticidade dinâmico permite avaliar a deformabilidade das argamassas. Ao aumento da deformabilidade das argamassas corresponde uma diminuição do seu módulo de elasticidade.

3.4.1 Resistência à tracção por flexão

Os resultados do ensaio de resistência à tracção por flexão para as várias argamassas estão descritos no quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Resistências à tracção por flexão das argamassas

Argamassa	R. Flexão [MPa]	Argamassa	R. Flexão [MPa]
st1a	0,14 ± 0,02	ST1A	0,17 ± 0,01
st1r	0,38 ± 0,02	ST1R	0,30 ± 0,04
st1f	0,54 ± 0,01	ST1F	0,58 ± 0,06
st2a	0,18 ± 0,02	ST2A	0,11 ± 0,02
st2r	0,14 ± 0,01	ST2R	0,13 ± 0,01
st2f	0,37 ± 0,04	ST2F	0,34 ± 0,02
st3a	1,04 ± 0,15	ST3A	0,76 ± 0,02
st3r	1,11 ± 0,04	ST3R	1,05 ± 0,12
st3f	1,26 ± 0,08	ST3F	1,35 ± 0,04
st1r+	0,30 ± 0,01	ST1R+	0,26 ± 0,03
st2r+	0,13 ± 0,01	ST2R+	0,11 ± 0,01
st3r+	1,07 ± 0,08	ST3R+	0,93 ± 0,02

A figura 3.4 apresenta graficamente os resultados do ensaio de resistência à tracção por flexão nas argamassas sem introdutor de ar. Estes resultados estão organizados por argamassas com o mesmo tipo de ligante, variando o tipo de areia e a quantidade de água.

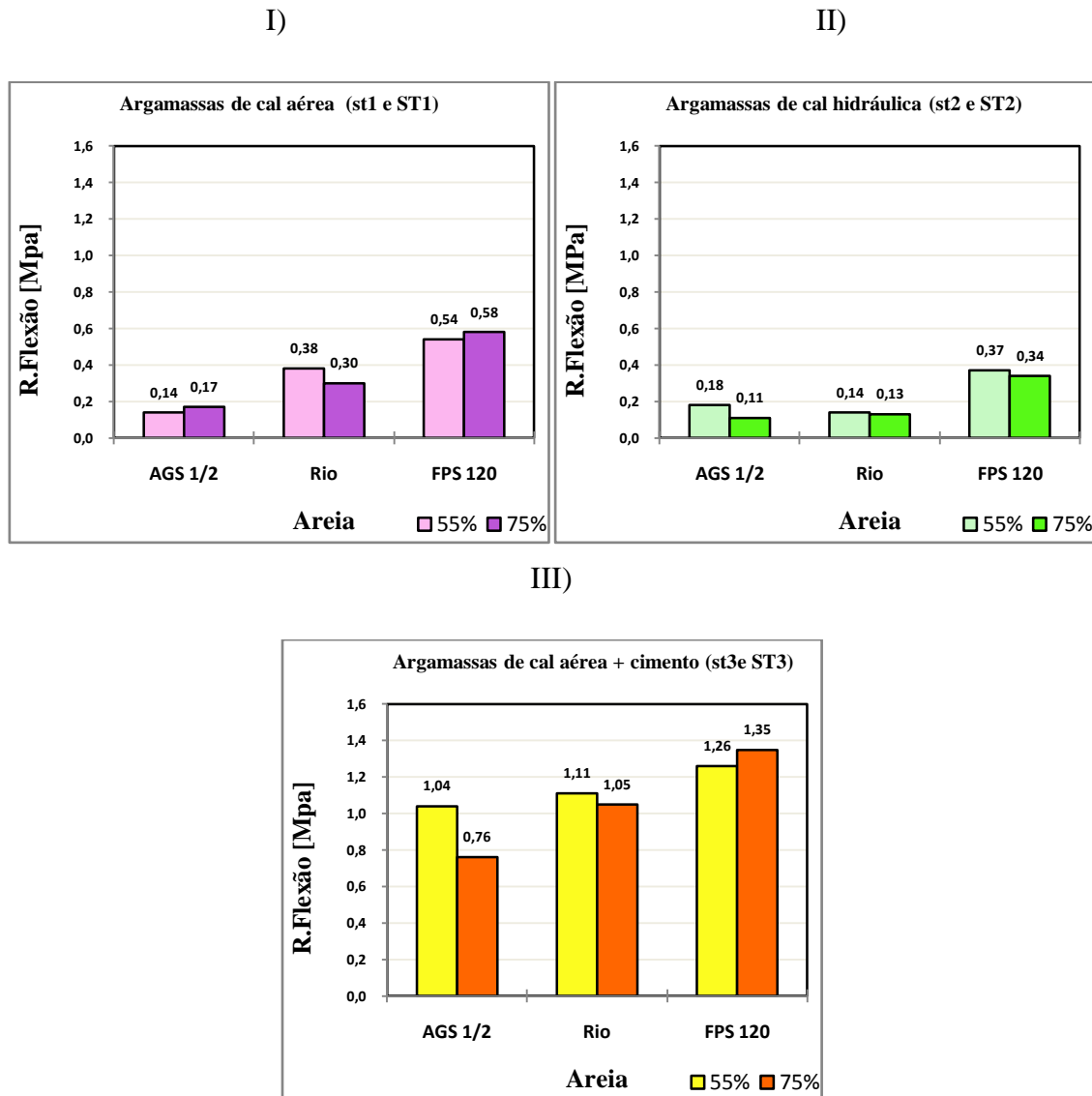


Figura 3.4 – Resistência à tracção por flexão das argamassas. I) Argamassas de cal aérea; II) Argamassas de cal hidráulica; III) Argamassas de cal aérea + cimento

Analisando a figura 3.4 em relação à resistência à tracção por flexão por tipo de ligante, verifica-se a ocorrência de dois factos diferentemente expectáveis. As argamassas bastardas são as que apresentam os maiores valores de resistência à flexão, confirmando que o cimento exponencia os valores relativamente às argamassas com ligante de cal aérea. Os resultados menos esperados, numa primeira análise, são os da cal hidráulica. As argamassas de cal hidráulica apresentam valores de resistência à tracção por flexão inferiores aos das argamassas de cal aérea. Estes valores podem ter como origem os diferentes traços de ligante usados; nas argamassas de cal aérea foi usado o traço de 1:2 e nas argamassas de cal hidráulica foi utilizado um traço de 1:3, mais fraco.

Em relação ao tipo de areias, nota-se um aumento das resistências à tracção por flexão com a diminuição da dimensão das partículas do agregado. Estes resultados não estão de acordo com o estudo de Reddy e Gupka [69] que referem o facto de as areias com grãos de menor dimensão formarem uma ligação areia-ligante mais fraca do que as areias com grãos de dimensão superior. Contrariando esta tendência, encontra-se a argamassa de cal hidráulica com areia AGS 1/2 e menor quantidade de água, cujo valor de resistência à tracção por flexão é maior que os valores nas argamassas com o mesmo ligante mas com areia de rio. Este valor pode ser o resultado da conjugação de dois factores; o traço e a dimensão da areia. Alguns autores explicam que, em certas argamassas, o aumento das dimensões dos grãos de areia leva a que a areia exerça uma maior importância em termos de resistência mecânica em relação ao ligante. Interligando esta explicação com o facto da quantidade de areia em relação às outras argamassas ser maior (traço mais fraco) podemos assim encontrar uma explicação para este valor.

A explicação do aumento das resistências à tracção por flexão com a diminuição do tamanho das partículas do agregado nas argamassas com ligante aéreo encontra-se na relação entre a porosidade e a carbonatação. O aumento da porosidade leva a que o dióxido de carbono penetre mais facilmente no interior da argamassa e se procedam as reacções de carbonatação mais rapidamente.

O aumento de água reduz a resistência à tracção por flexão das argamassas, sendo esta tendência comprovada pela figura 3.4 II) e III). Nas argamassas de cal aérea não existe nenhuma tendência, visto que diferentes agregados têm comportamentos distintos. Ainda assim os valores de resistência à tracção por flexão com diferentes quantidades de água nestas argamassas são muito próximos.

A figura 3.5 traduz a comparação dos valores de resistência à tracção por flexão de argamassas com e sem introdutor de ar.

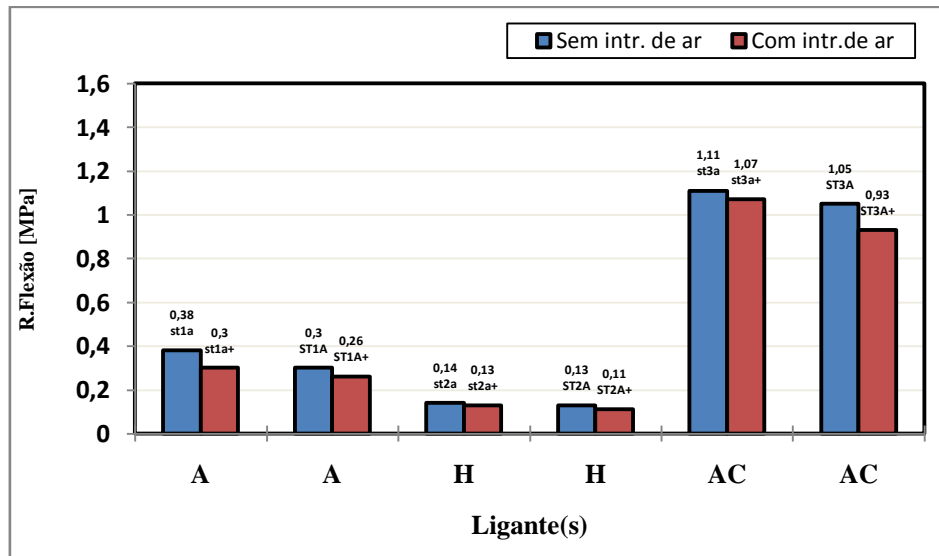


Figura 3.5 – Comparação dos valores de resistência à tracção por flexão de argamassas com e sem introdutor de ar. A – cal aérea; H – cal hidráulica; AC – cal aérea + cimento

A análise da figura 3.5 confirma a ideia de que a utilização do introdutor de ar faz reduzir a resistência mecânica das argamassas. Esta conclusão está de acordo com os autores com trabalhos sobre estes temas.

3.4.2 Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão para as várias argamassas estão descritos no quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Resistências à compressão das argamassas

Argamassa	R. Compressão [MPa]	Argamassa	R. Compressão [MPa]
st1a	0,43 ± 0,01	ST1A	0,46 ± 0,02
st1r	1,13 ± 0,06	ST1R	1,01 ± 0,07
st1f	2,29 ± 0,11	ST1F	2,23 ± 0,06
st2a	1,20 ± 0,10	ST2A	0,53 ± 0,05
st2r	0,51 ± 0,02	ST2R	0,43 ± 0,01
st2f	0,83 ± 0,04	ST2F	0,79 ± 0,08
st3a	6,88 ± 0,15	ST3A	3,95 ± 0,62
st3r	5,67 ± 0,69	ST3R	4,89 ± 0,25
st3f	5,82 ± 0,37	ST3F	5,00 ± 0,03
st1r+	1,24 ± 0,01	ST1R+	1,04 ± 0,05
st2r+	0,56 ± 0,04	ST2R+	0,52 ± 0,03
st3r+	5,29 ± 0,04	ST3R+	5,13 ± 0,20

A figura 3.6 apresenta graficamente os resultados do ensaio de resistência à compressão nas argamassas sem introdutor de ar. Estes resultados estão organizados por argamassas com o mesmo tipo de ligante, variando o tipo de areia e a quantidade de água.

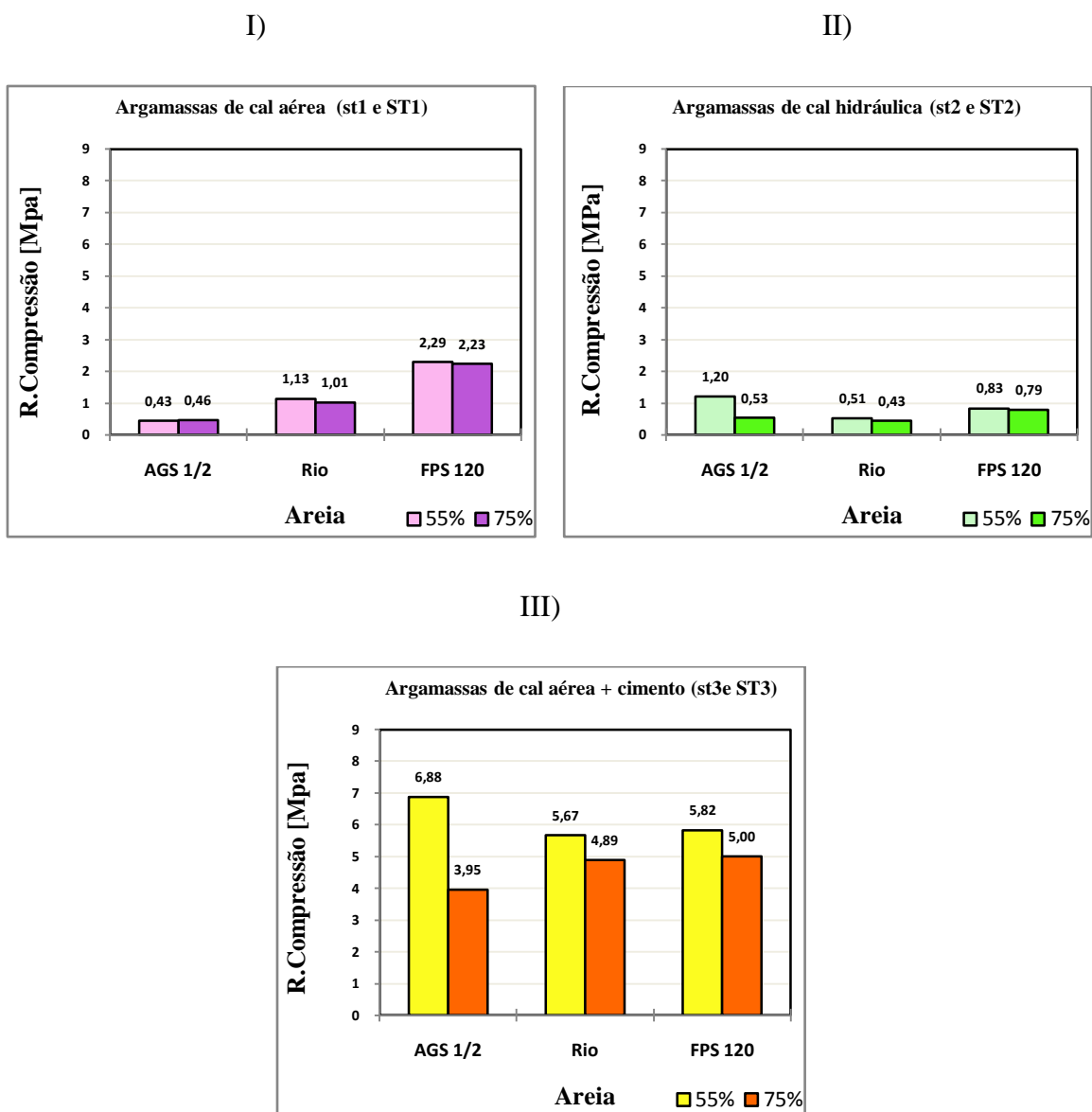


Figura 3.6 – Resistência à compressão das argamassas. I) Argamassas de cal aérea; II) Argamassas de cal hidráulica; III) Argamassas de cal aérea + cimento

Observando a figura 3.6, relativamente ao tipo de ligante, as argamassas bastardas (st3 e ST3) são as que apresentam maiores valores de resistência à compressão e as de cal hidráulica os menores valores. É atribuída a mesma explicação (traço) do ensaio da

resistência à tracção por flexão para o facto das argamassas de cal hidráulica apresentarem valores menores que as argamassas de cal aérea.

É verificada a mesma tendência em relação à dimensão das partículas de areia relativamente ao ensaio de resistência à tracção por flexão. A resistência à compressão aumenta com a diminuição da granulometria da areia. As excepções a esta regra ocorrem na argamassa de cal hidráulica com areia AGS 1/2 e na argamassa de cal aérea + cimento com a mesma areia. A explicação para estes valores parece ser a mesma do caso da resistência à flexão. É de notar que os casos de valores díspares da tendência verificada, tanto na resistência à tracção por flexão como da resistência à compressão, acontecem sempre com a mesma areia. A areia AGS 1/2 tem uma granulometria elevada, e esse factor pode ser a causa destas pequenas discrepâncias. Uma maior concentração de grãos numa certa zona da argamassa a ensaiar pode fazer com que estes assumam um papel maioritário em relação às resistências mecânicas e, assim, os resultados saiam ligeiramente alterados.

Em relação à quantidade de água, verifica-se a tendência esperada, a diminuição da resistência à compressão com o aumento de água na argamassa. Esta tendência parece indicar que os resultados díspares em relação à cal aérea no ensaio de resistência à flexão foram fortuitos.

A figura 3.7 traduz a comparação dos valores de resistência à compressão de argamassas com e sem introdutor de ar.

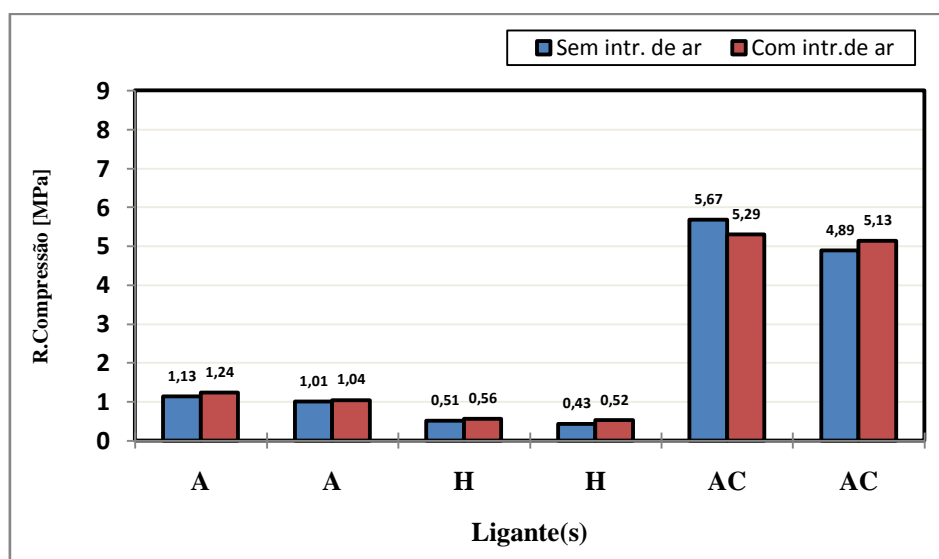


Figura 3.7 – Comparação dos valores de resistência à compressão de argamassas com e sem introdutor de ar. A – cal aérea; H – cal hidráulica; AC – cal aérea + cimento

Os resultados da figura 3.7 foram surpreendentes em vários aspectos. De acordo com o que foi obtido, a tendência é de subida dos valores de resistência à compressão das argamassas com a utilização do introdutor de ar. Estes valores contrariam a opinião geral de que o introdutor de ar, ao aumentar a porosidade das argamassas, diminui as suas resistências mecânicas. O tempo de cura das argamassas de cal aérea com introdutor de ar foi inferior ao das argamassas semelhantes sem introdutor de ar, o que dificulta ainda mais a compreensão deste resultado. Os resultados dos ensaios de resistência à tracção por flexão e compressão deveriam seguir a mesma tendência, facto que não se verifica. Todos estes factores podem indicar um improvável melhoramento da resistência à compressão provocado pelos componentes do introdutor de ar. Esta assunção é pouco provável. O comportamento deste produto deveria ser melhor estudado para uma melhor compreensão do seu efeito nas argamassas já que, como indicado na sua ficha técnica (anexo 1), é destinado para betões. O aspecto da carbonatação, principalmente nas argamassas com ligante aéreo tem influência no comportamento das argamassas. Uma maior porosidade, como visto anteriormente, conduz a um maior espaço de passagem de dióxido de carbono no interior da argamassa de modo ao processo de carbonatação e endurecimento se efectuarem mais rapidamente.

3.4.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico permite avaliar a deformabilidade das argamassas. Ao aumento da deformabilidade das argamassas corresponde uma diminuição do seu módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade foi determinado através do método dinâmico, não destrutivo, o que implica uma menor precisão nos resultados obtidos comparando com o método estático, destrutivo. É de realçar que, como descrito em 2.7.5, cada provete foi ensaiado em duas posições distintas.

Os resultados do ensaio para as várias argamassas estão descritos no quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos das argamassas

Argamassa	E. dinâmico [MPa]	Argamassa	E. dinâmico [MPa]
st1a	1345±11	ST1A	1487±55
st1r	2390±70	ST1R	2179±112
st1f	2707±21	ST1F	2703±24
st2a	4670±220	ST2A	4493±1879
st2r	5982±87	ST2R	2559±30
st2f	4646±81	ST2F	4568±87
st3a	7113±111	ST3A	4515±301
st3r	5203±192	ST3R	4935±241
st3f	3606±76	ST3F	3264±35
st1r+	2181±57	ST1R+	1978±10
st2r+	4957±1635	ST2R+	1384±1000
st3r+	5012±288	ST3R+	4681±15

Os resultados do ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico requerem uma interpretação maioritariamente qualitativa devido à discrepância de alguns valores com argamassas iguais ou entre os mesmos provetes. Este facto provém de factores como a sensibilidade do equipamento e o erro humano introduzido pelo operador na colocação do provete e pela distância do provete à unidade receptora.

A figura 3.8 apresenta graficamente os resultados do ensaio para as argamassas sem introdutor de ar. Estes resultados estão organizados por argamassas com o mesmo tipo de ligante, variando o tipo de areia e a quantidade de água.

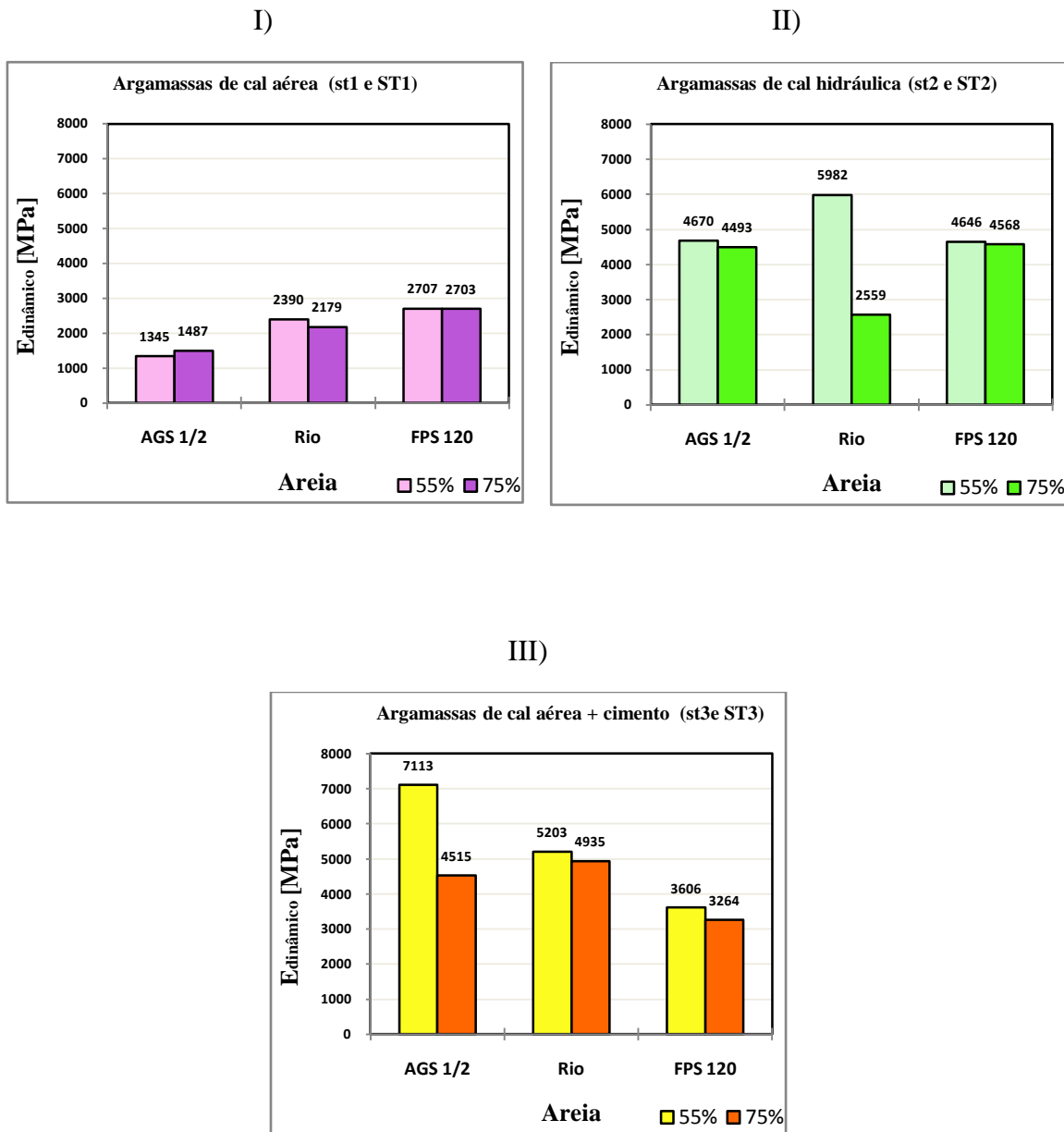


Figura 3.8 – Módulos de elasticidade dinâmicos das argamassas. I) Argamassas de cal aérea; II) Argamassas de cal hidráulica; III) Argamassas de cal aérea + cimento

As representações gráficas da figura 3.8 demonstram que as argamassas de cal aérea são as que apresentam os valores mais baixos do módulo de elasticidade, pelo que, estas são as mais deformáveis, confirmando assim a opinião da maioria dos autores que referem esta característica. A adição de cimento à cal aérea faz aumentar os valores do módulo de elasticidade das argamassas. Quanto maior a quantidade de cimento maior a rigidez da argamassa. As argamassas de cal hidráulica têm, como tendência geral, um

comportamento intermédio, embora as argamassas com areia FPS 120 não confirmem este facto.

A evolução do módulo de elasticidade dinâmico com a dimensão das partículas da areia não apresenta a mesma tendência em cada um dos tipos de argamassas. Nas argamassas de cal aérea verifica-se o aumento do módulo de elasticidade dinâmico com a diminuição da granulometria das areias. As argamassas de cal hidráulica apresentam valores semelhantes enquanto que, nas argamassas de cal aérea + cimento, a tendência é de descida. É de certa importância ressaltar que, para esta análise, excluíram-se os valores das argamassas de cal hidráulica com areia de rio pois existe uma grande discrepância de valores. A tendência de subida dos valores nas argamassas de cal com a diminuição da granulometria da areia parece inverter-se com o aumento da hidraulicidade do ligante.

O aumento da quantidade de água em argamassas com constituição semelhante faz baixar, de uma forma geral, o módulo de elasticidade dinâmico. Esta tendência é contrariada pela argamassa de cal aérea com areia AGS 1/2. A explicação pode ser a reduzida diferença entre quantidades de água na obtenção dos respectivos espalhamentos.

A figura 3.9 traduz a comparação dos valores de módulo de elasticidade dinâmico de argamassas com e sem introdutor de ar.

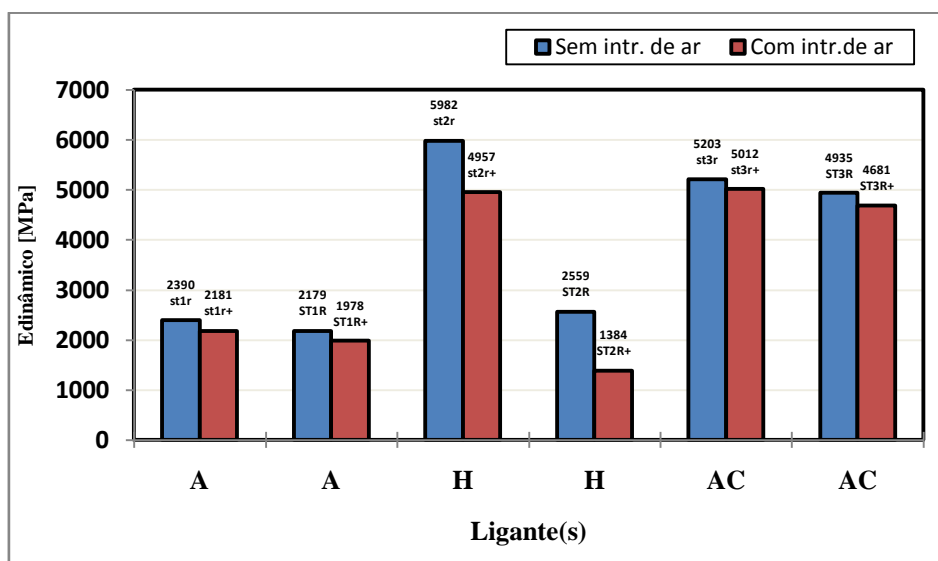


Figura 3.9 – Comparação dos valores de módulo de elasticidade dinâmico de argamassas com e sem introdutor de ar. A – cal aérea; H – cal hidráulica; AC – cal aérea + cimento

A figura 3.9 revela a descida do módulo de elasticidade dinâmico com o uso do introdutor de ar em todas as argamassas, mostrando que o introdutor de ar parece ter uma influência, neste parâmetro, semelhante ao aumento da quantidade de água.

3.5 Difusão do vapor de água

O ensaio de difusão do vapor de água tem o objectivo de avaliar a capacidade da argamassa em se deixar atravessar pelo vapor. Este ensaio requer um manuseamento de todos os materiais com especial cuidado pois, não sendo um ensaio destrutivo, existem certos passos que, uma vez dados, são irreversíveis. Um dos três provetes de cal aérea com areia AGS1/2 e menor quantidade de água (st1a) no processo de introdução na cápsula foi partido; assim, o valor do coeficiente de difusão do vapor de água foi obtido através dos restantes dois provetes.

No decorrer do ensaio observaram-se algumas anomalias em alguns provetes, nomeadamente em relação às argamassas de cal hidráulica. O silicone usado para a selagem das cápsulas, ao longo das medições, apresentou alguma retracção e maior rigidez em relação ao usado nos demais provetes. Este comportamento pôde ser devido às condições da câmara climática no contexto das propriedades específicas deste silicone. Nos provetes com areia FPS 120, a retracção do silicone originou a descolagem deste do provete (figura 3.10 I)). Nos provetes com areia AGS 1/2 e maior quantidade de água (ST2A), foram visualizadas fissuras devido à sua retracção (figura 3.10 II)). Os restantes provetes não apresentaram danos visíveis à excepção de um ligeiro descolamento do silicone nas argamassas de cal hidráulica com areia de rio.



Figura 3.10 – Anomalias em provetes derivadas ao silicone.

Estas anomalias levaram a que se utilizassem as primeiras medições a fluxo constante das argamassas na obtenção de resultados, de modo a evitar a influência do comportamento do silicone, deste modo, os valores escolhidos ocorreram antes da verificação das anomalias no silicone. De forma a ser possível a comparação de resultados do ensaio, aplicou-se o mesmo critério para todas as argamassas. Os resultados do ensaio de difusão do vapor de água para as várias argamassas estão descritos no quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Coeficientes de permeabilidade ao vapor de água das argamassas

Argamassa	$\pi \times 10^{-11}$ [kg/m.s.Pa]	Argamassa	$\pi \times 10^{-11}$ [kg/m.s.Pa]
st1a	$2,09 \pm 0,07$	ST1A	$1,89 \pm 0,02$
st1r	$1,80 \pm 0,05$	ST1R	$1,92 \pm 0,08$
st1f	$1,95 \pm 0,06$	ST1F	$2,08 \pm 0,03$
st2a	$1,96 \pm 0,10$	ST2A	$2,17 \pm 0,07$
st2r	$1,97 \pm 0,08$	ST2R	$1,96 \pm 0,08$
st2f	$2,62 \pm 0,10$	ST2F	$2,71 \pm 0,23$
st3a	$1,51 \pm 0,03$	ST3A	$1,61 \pm 0,03$
st3r	$1,67 \pm 0,02$	ST3R	$1,74 \pm 0,05$
st3f	$1,87 \pm 0,07$	ST3F	$1,96 \pm 0,06$
st1r+	$1,79 \pm 0,06$	ST1R+	$1,97 \pm 0,03$
st2r+	$1,88 \pm 0,06$	ST2R+	$1,95 \pm 0,05$
st3r+	$1,83 \pm 0,08$	ST3R+	$1,96 \pm 0,04$

A figura 3.11 apresenta graficamente os resultados do ensaio de difusão do vapor de água nas argamassas sem introdutor de ar. Estes resultados estão organizados por argamassas com o mesmo tipo de ligante, variando o tipo de areia e a quantidade de água.

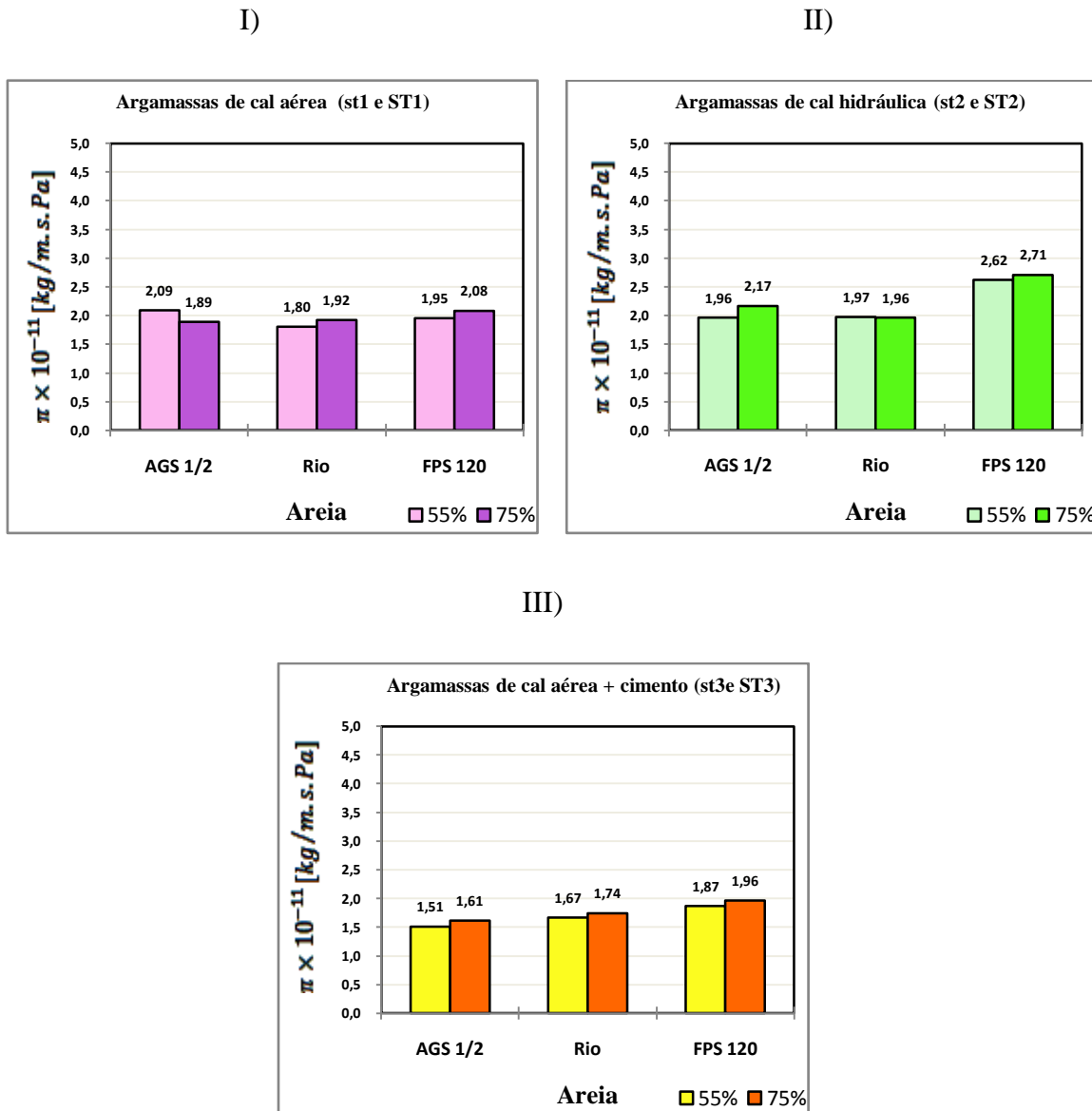


Figura 3.11 – Valores do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água das argamassas. I) Argamassas de cal aérea; II) Argamassas de cal hidráulica; III) Argamassas de cal aérea + cimento

As argamassas bastardas (III) são as que apresentam os menores valores de coeficiente de permeabilidade ao vapor de água. Mosquera *et al* [60] confirmam esta tendência geral, afirmando: “the coefficient was found to decrease progressively as cement content increased“. Devido às anomalias ocorridas com os provetes de cal hidráulica, pensa-se que os valores do coeficiente de permeabilidade foram um pouco mais elevados do que o normal. Contemplando esta situação, confirma-se a opinião geral de que as argamassas de cal aérea são as de maior permeabilidade ao vapor de água. As argamassas que atingiram primeiramente o regime constante de fluxo de vapor de água foram as bastardas, sendo seguidas pelas argamassas de cal aérea e hidráulica, estas com

comportamentos semelhantes. Estes resultados contrariam o estudo de Mosquera et al [60] que afirma serem as argamassas bastardas as últimas a atingirem o regime constante de fluxo.

A diminuição da granulometria da areia origina uma tendência de subida do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água. Derivado aos problemas ocorridos nas argamassas de cal hidráulica com areia AGS 1/2 e areia FPS 120, os valores do coeficiente deveriam ser menores, o que confirmaria esta tendência. Por sua vez, a tendência observada é contrariada pela argamassa de cal aérea com areia AGS 1/2 que apresenta um valor acima do esperado.

Em relação à quantidade de água na argamassa, a figura 3.11 demonstra a tendência do aumento do coeficiente de permeabilidade com o aumento da quantidade de água, como era esperado. As argamassas de cal aérea com areia AGS 1/2 e de cal hidráulica com areia de rio não demonstram esta tendência. Sendo os valores do coeficiente de permeabilidade destas argamassas com maior e menor quantidade de água muito próximos, acredita-se que estes resultados não são representativos.

A figura 3.12 traduz a comparação dos valores dos coeficientes de permeabilidade ao vapor de água de argamassas com e sem introdutor de ar.

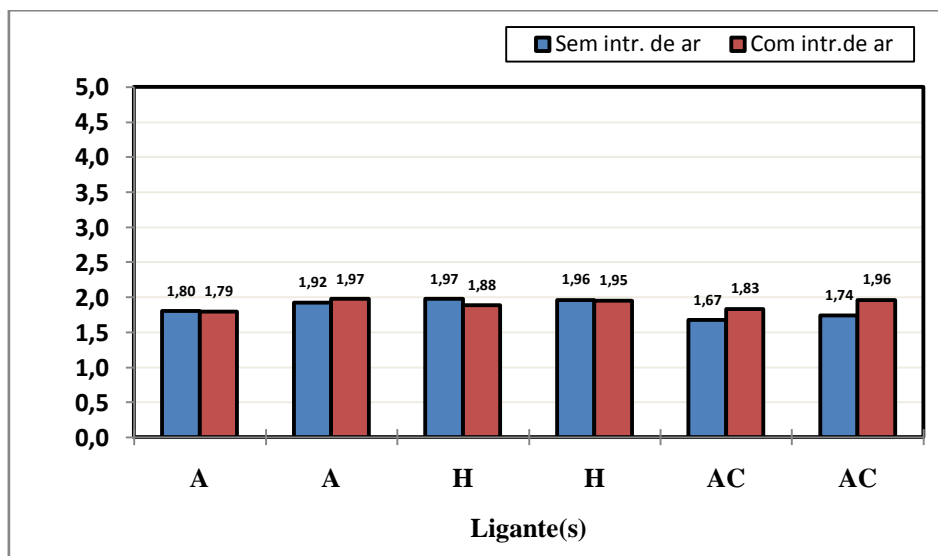


Figura 3.12 – Comparação dos valores dos coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de argamassas com e sem introdutor de ar. A – cal aérea; H – cal hidráulica; AC – cal aérea + cimento

Como já foi referido anteriormente, as argamassas de cal hidráulica sem introdutor de ar evidenciaram problemas com o silicone. Com a abordagem desta situação e chegada à conclusão que os valores sem introdutor de ar deveriam ser menores, verifica-se a tendência de aumento do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água com o uso do introdutor de ar nas argamassas. Este aumento é somente contrariado pela argamassa de cal aérea com areia AGS 1/2, sendo que os valores são muito próximos.

3.6 Secagem de argamassas

O ensaio de secagem fornece-nos informações sobre a velocidade de secagem das argamassas. Este factor é muito importante uma vez que, quanto menor for a quantidade de água no interior da argamassa, menor o dano provocado pelos ciclos gelo/degelo.

A quebra de um provete no ensaio de capilaridade levou a que os resultados da argamassa de cal hidráulica com areia de rio, maior quantidade de água e introdutor de ar fossem calculados com apenas dois provetes. As argamassas foram ensaiadas em duas fases. Na primeira fase ensaiaram-se os provetes de cal aérea e cal hidráulica sem introdutor de ar. Esta fase decorreu normalmente de acordo com as condições climáticas previstas. Na segunda fase, foram ensaiados os provetes de argamassas bastardas e todos os provetes com introdutor de ar. Nesta fase, ocorreram alguns problemas com o climatizador da sala climatizada. Registaram-se variações significativas de temperatura e humidade relativa, o que leva a admitir que os resultados do ensaio possam estar, pelo menos parcialmente, comprometidos.

Os resultados do ensaio de secagem das argamassas estão descritos no quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Índices de secagem das argamassas

Argamassa	Índice de secagem	Argamassa	Índice de secagem
st1a	$0,036 \pm 0,001$	ST1A	$0,042 \pm 0,006$
st1r	$0,055 \pm 0,012$	ST1R	$0,049 \pm 0,006$
st1f	$0,060 \pm 0,007$	ST1F	$0,061 \pm 0,007$
st2a	$0,039 \pm 0,001$	ST2A	$0,046 \pm 0,002$
st2r	$0,043 \pm 0,006$	ST2R	$0,047 \pm 0,004$
st2f	$0,047 \pm 0,002$	ST2F	$0,049 \pm 0,001$
st3a	$0,013 \pm 0,001$	ST3A	$0,013 \pm 0,000$
st3r	$0,014 \pm 0,000$	ST3R	$0,015 \pm 0,001$
st3f	$0,014 \pm 0,002$	ST3F	$0,014 \pm 0,000$
st1r+	$0,030 \pm 0,000$	ST1R+	$0,026 \pm 0,001$
st2r+	$0,032 \pm 0,001$	ST2R+	$0,033 \pm 0,000$
st3r+	$0,023 \pm 0,002$	ST3R+	$0,025 \pm 0,001$

A figura 3.13 apresenta graficamente os resultados do ensaio de secagem das argamassas sem introdutor de ar. Estes resultados estão organizados por argamassas com o mesmo tipo de ligante, variando o tipo de areia e a quantidade de água.

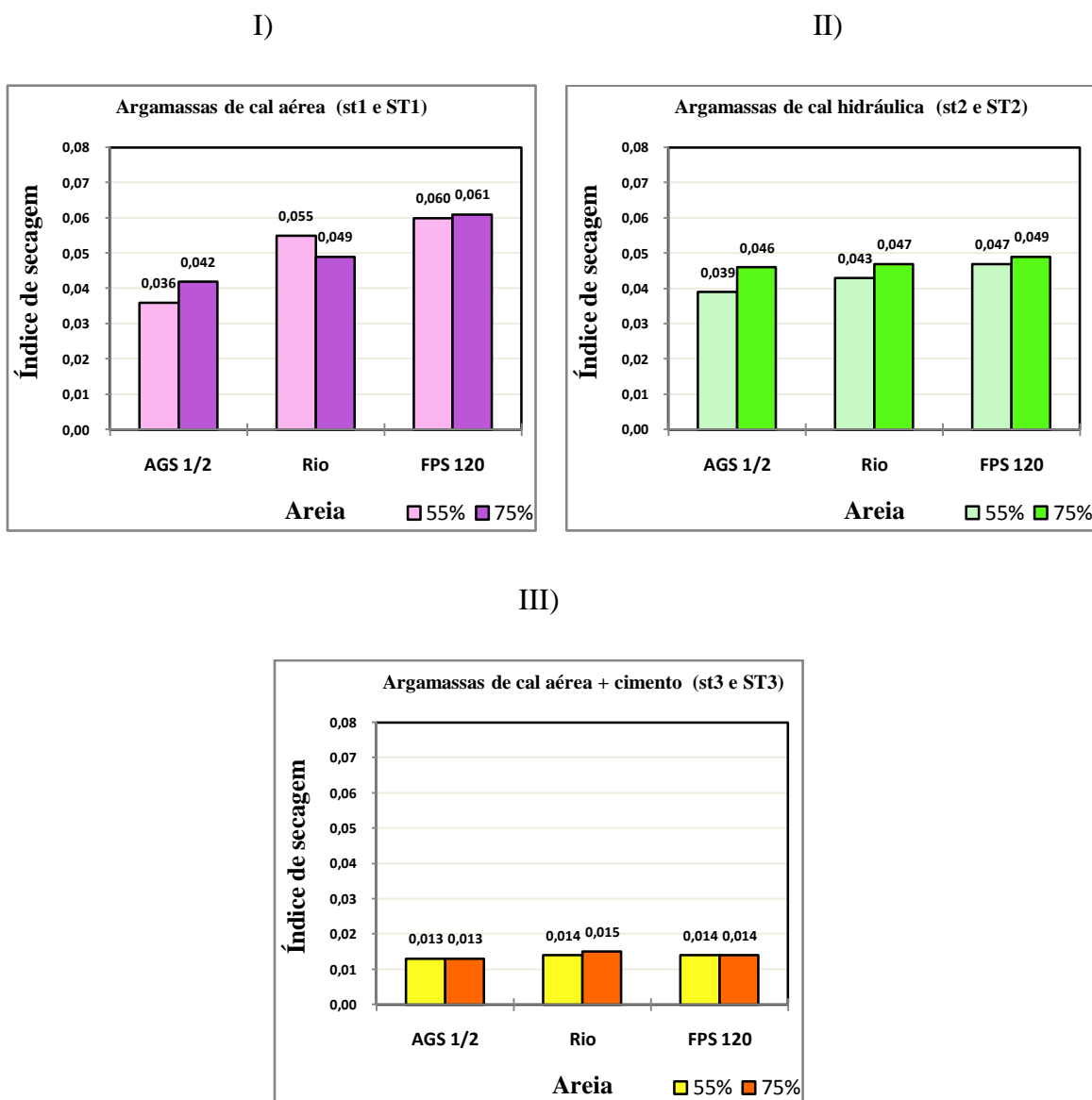


Figura 3.13 – Valores dos índices de secagem das argamassas. I) Argamassas de cal aérea; II) Argamassas de cal hidráulica; III) Argamassas de cal aérea + cimento

As argamassas de cal aérea são as que apresentam maiores valores de índice de secagem e as argamassas de cal aérea + cimento os menores valores com uma diferença significativa. As argamassas de cal hidráulica têm comportamento intermédio exceptuando os provetes com areia AGS 1/2 que apresentam valores superiores aos de cal aérea com o mesmo tipo de areia, sendo que estes são muito próximos.

Analisando a figura 3.13 de acordo com o tipo de areia verifica-se que, nas argamassas de cal aérea e de cal hidráulica, o índice de secagem sobe com a diminuição da

granulometria da areia. As argamassas de cal aérea + cimento apresentam valores muito próximos com as diferentes areias.

O índice de secagem nas argamassas de cal aérea e de cal hidráulica apresenta uma tendência de subida com o aumento da água de amassadura. Este aumento é contrariado pela argamassa de cal aérea com areia de rio. Este desvio de comportamento provavelmente é originário de um acaso como indicia o elevado desvio padrão da argamassa com menor quantidade de água (st1r). As argamassas de cal aérea + cimento, à semelhança da análise em relação ao tipo de agregado, apresentam valores muito próximos com diferentes quantidades de água.

É de realçar, relativamente ao comportamento das argamassas de cal aérea + cimento, desconhecer-se se este é o normal devido à inconstância de condições climáticas da sala já referidas.

A figura 3.14 traduz a comparação dos valores do índice de secagem das argamassas com e sem introdutor de ar.

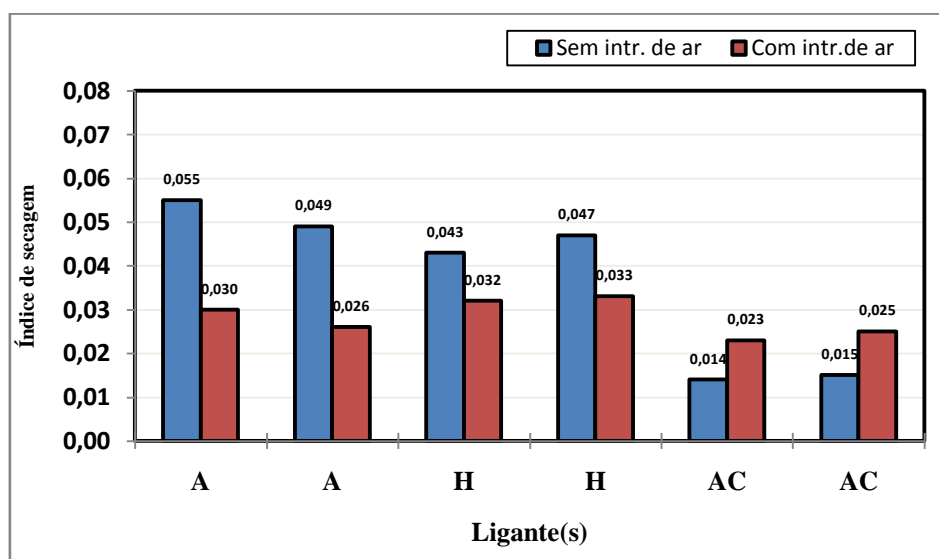


Figura 3.14 – Comparação dos valores do índice de secagem das argamassas com e sem introdutor de ar.
A – cal aérea; H – cal hidráulica; AC – cal aérea + cimento

Através da análise da figura 3.14 podem identificar-se duas tendências diferentes. Nas argamassas de cal aérea e de cal hidráulica a utilização do introdutor de ar faz baixar claramente o índice de secagem. As argamassas de cal aérea + cimento apresentam a tendência inversa.

Tal como já foi abordado, nas argamassas de cal aérea e cal hidráulica, os provetes com e sem introdutor de ar foram ensaiados em fases diferentes e, devido aos problemas da segunda fase, as tendências evidenciadas não podem ser tomadas como certas. No entanto, devido ao facto da diferença de valores ser muito grande, acredita-se que a tendência se mantém mas com valores mais próximos. As argamassas de cal aérea + cimento com e sem utilização do introdutor de ar foram estudadas na mesma fase. A tendência nestas argamassas toma-se como certa, porém a ordem de grandeza dos valores não pode ser comprovada.

3.7 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade permite avaliar a cinética de absorção de água das argamassas ao longo do tempo até atingir o equilíbrio, correspondente à absorção máxima. Este ensaio é de extrema importância na caracterização do comportamento das argamassas aos ciclos gelo/degelo.

Os resultados relativos à argamassa de cal hidráulica com areia de rio, maior quantidade de água e com introdutor de ar (ST2R+), são o resultado da média de dois provetes, já que, no decorrer do ensaio, o terceiro provete se quebrou. Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas estão descritos no quadro 3.10.

Quadro 3.10 – Coeficientes de absorção de água por capilaridade ($C. A_{cap}$) e valores assintóticos de absorção ($V. A.$) das argamassas

Argamassa	$C. A_{cap}$ [$kg/m^2.s^{0,5}$]	$V. A.$ [kg/m^2]	Argamassa	$C. A_{cap}$ [$kg/m^2.s^{0,5}$]	$V. A.$ [kg/m^2]
st1a	$0,424 \pm 0,008$	$33,728 \pm 0,212$	ST1A	$0,390 \pm 0,005$	$33,975 \pm 0,118$
st1r	$0,240 \pm 0,001$	$35,095 \pm 0,439$	ST1R	$0,261 \pm 0,001$	$36,311 \pm 0,411$
st1f	$0,291 \pm 0,005$	$39,409 \pm 0,138$	ST1F	$0,237 \pm 0,006$	$38,751 \pm 0,105$
st2a	$0,259 \pm 0,006$	$30,807 \pm 0,390$	ST2A	$0,414 \pm 0,013$	$36,496 \pm 0,637$
st2r	$0,373 \pm 0,009$	$40,030 \pm 0,229$	ST2R	$0,431 \pm 0,002$	$42,697 \pm 0,473$
st2f	$0,580 \pm 0,011$	$52,599 \pm 0,479$	ST2F	$0,632 \pm 0,024$	$53,142 \pm 0,679$
st3a	$0,163 \pm 0,004$	$25,593 \pm 0,814$	ST3A	$0,277 \pm 0,013$	$31,604 \pm 0,616$
st3r	$0,274 \pm 0,008$	$37,195 \pm 0,705$	ST3R	$0,300 \pm 0,002$	$38,264 \pm 0,073$
st3f	$0,440 \pm 0,021$	$48,774 \pm 0,701$	ST3F	$0,420 \pm 0,021$	$50,317 \pm 0,930$
st1r+	$0,251 \pm 0,002$	$35,959 \pm 0,329$	ST1R+	$0,265 \pm 0,001$	$36,205 \pm 0,198$
st2r+	$0,327 \pm 0,009$	$36,630 \pm 0,086$	ST2R+	$0,363 \pm 0,016$	$37,738 \pm 1,141$
st3r+	$0,256 \pm 0,004$	$35,739 \pm 0,058$	ST3R+	$0,278 \pm 0,005$	$36,646 \pm 0,274$

3.7.1 Evolução da absorção e valor assintótico

A figura 3.15 traduz a evolução de absorção de água por capilaridade das argamassas em função do tempo. Estes resultados estão organizados por argamassas com o mesmo tipo de ligante, variando o tipo de areia e a quantidade de água.

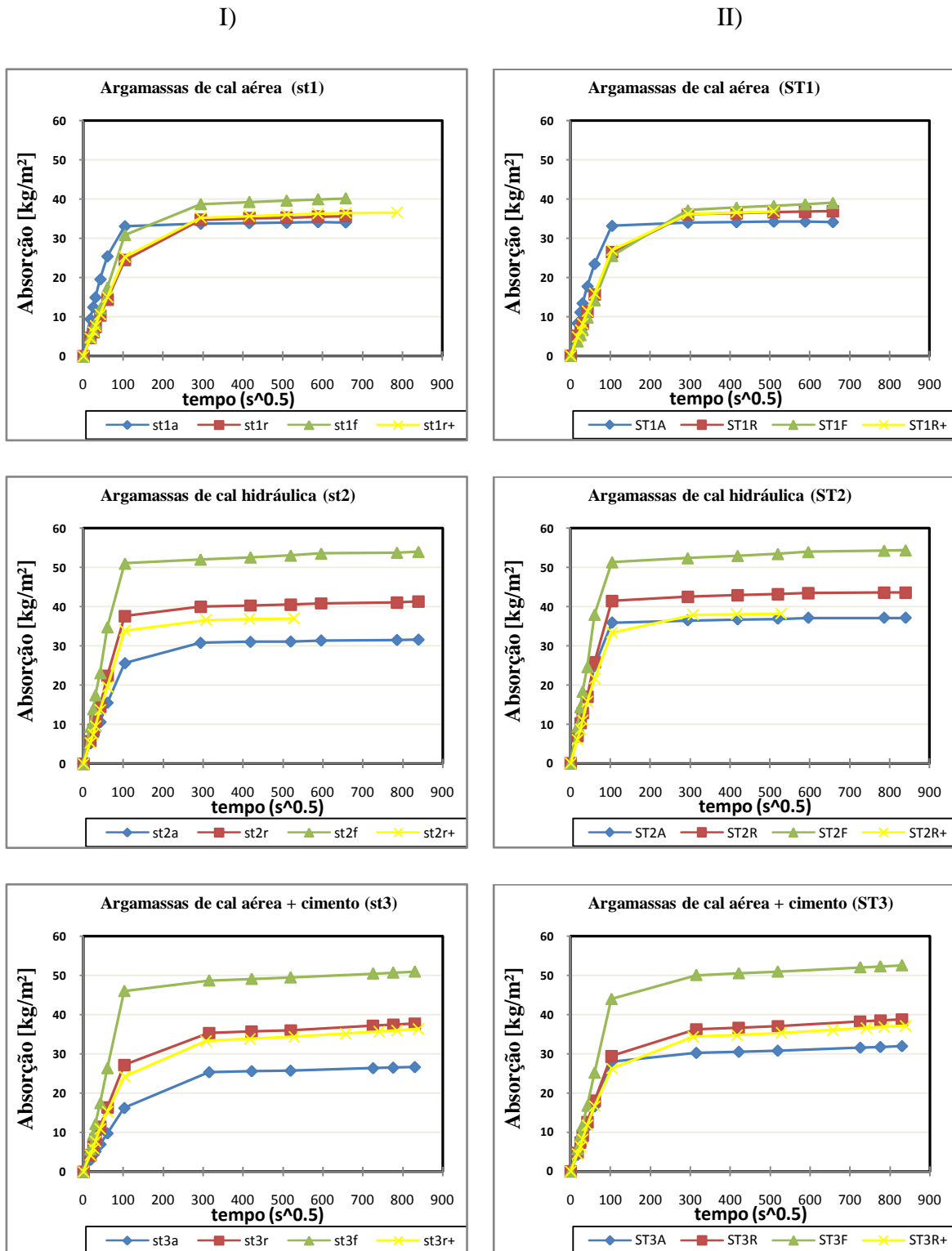


Figura 3.15 – Evolução da absorção de água por capilaridade das argamassas em função do tempo. I) Argamassas com menor quantidade de água; II) Argamassas com maior quantidade de água

Analisando a figura 3.15 verifica-se que as argamassas de cal aérea apresentam uma menor dispersão nos valores assintóticos de absorção em relação às outras argamassas. As argamassas de cal hidráulica apresentam uma cinética de absorção mais linear, já

que, a partir do instante 100, na maioria das argamassas, a absorção estabiliza. É também este tipo de argamassas que, geralmente, exibe os maiores valores de absorção.

Todas as argamassas mostram a clara tendência de maior absorção de água por capilaridade com a diminuição da granulometria da areia.

Um aumento de água nas argamassas traduz um maior valor assintótico de absorção. A argamassa st1f é uma exceção a esta afirmação, sendo que o valor se encontra muito próximo do apresentado pela argamassa semelhante com maior quantidade de água.

Geralmente, o valor assintótico de absorção capilar diminui com a utilização do introdutor de ar nas argamassas. Esta tendência não é verificada nas argamassas de cal aérea, nas quais os valores são muito próximos.

3.7.2 Coeficiente de absorção capilar

O coeficiente de absorção de água por capilaridade corresponde ao coeficiente angular do troço inicial das curvas traçadas e foi obtido considerando os primeiros 60 minutos de ensaio. Este coeficiente é considerado como a “velocidade de absorção inicial”.

A figura 3.16 mostra graficamente os valores dos coeficientes de absorção capilar das argamassas sem introdutor de ar. Estes resultados estão organizados por argamassas com o mesmo tipo de ligante, variando o tipo de areia e a quantidade de água.

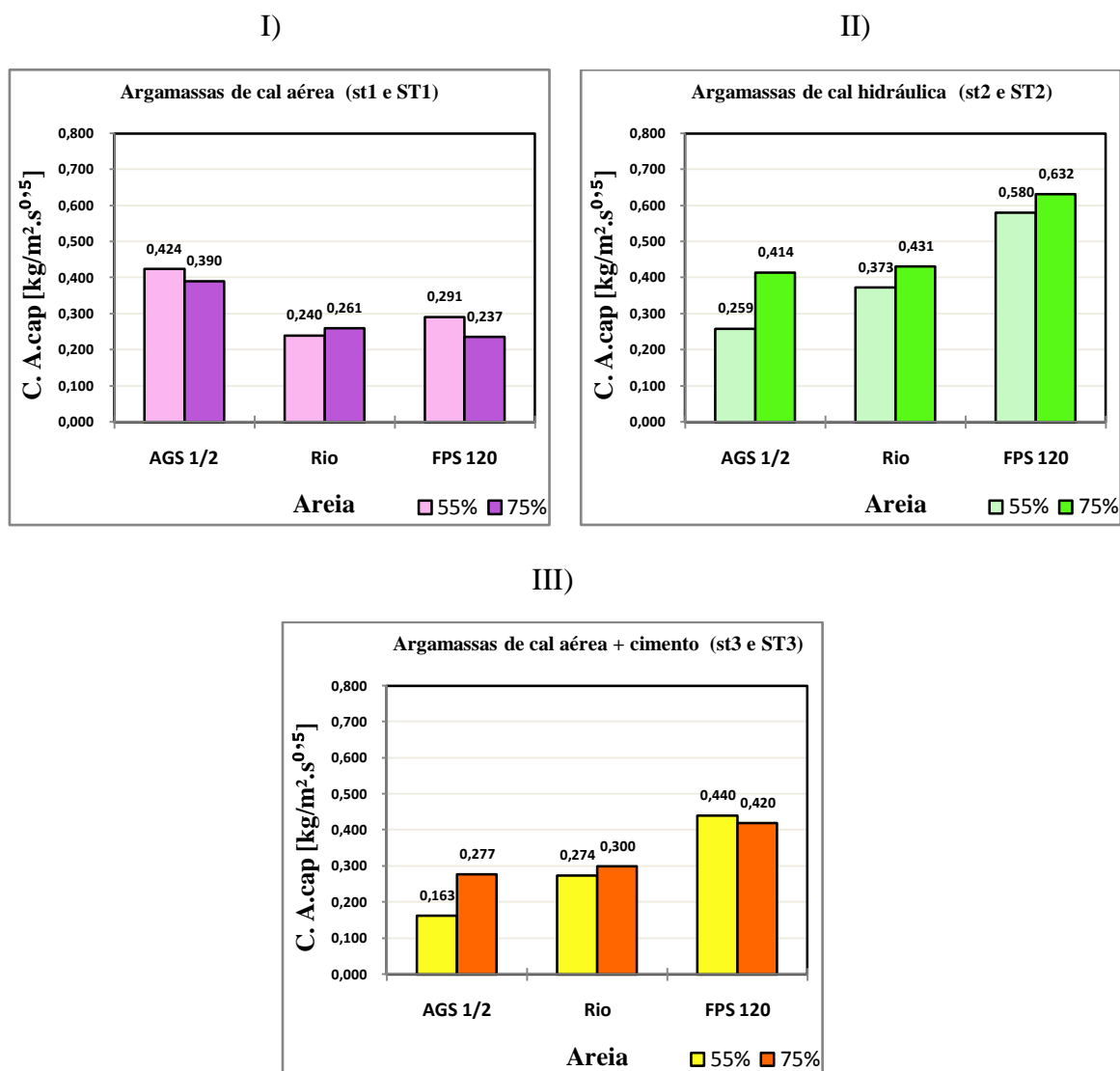


Figura 3.16 – Valores dos coeficientes de absorção capilar das argamassas. I) Argamassas de cal aérea; II) Argamassas de cal hidráulica; III) Argamassas de cal aérea + cimento

Através da análise da figura 3.16 identificam-se as argamassas de cal hidráulica como tendo os maiores coeficientes de absorção de água por capilaridade. A argamassa (st2a) é exceção, já que apresenta um valor inferior em relação à st1a. Tomando a areia de rio como referência de comparação entre o comportamento das argamassas de cal aérea e cal aérea + cimento (os valores são semelhantes nas duas argamassas), é verificado que a introdução do cimento nas argamassas, faz diminuir os valores do coeficiente de absorção por capilaridade nas argamassas com areia AGS1/2 e aumentar o coeficiente nas argamassas com areia FPS 120.

Identificam-se duas tendências contrárias entre as argamassas com ligante hidráulico e as argamassas de cal aérea. Nas argamassas de cal aérea o coeficiente de absorção capilar diminui com a diminuição da granulometria da areia, enquanto que, nas argamassas com ligantes hidráulicos, o coeficiente aumenta com a respectiva redução da diminuição do agregado. Este facto é devido à granulometria do ligante, a cal aérea é o ligante com menor granulometria.

As argamassas com ligantes hidráulicos apresentam uma tendência de subida nos valores do coeficiente de absorção capilar com o aumento de água de amassadura. A excepção é a argamassa de cal aérea + cimento com areia FPS120 (ST3F) cujo valor indica o contrário. Esta situação pode ser explicada por uma diferença de valores num dos três provetes ensaiados, o que parece confirmado pelo desvio padrão das argamassas st3f e ST3F. Nas argamassas de cal aérea com areia AGS1/2 e areia FPS120, o aumento da quantidade de água de amassadura faz diminuir o coeficiente de absorção capilar, enquanto que nas argamassas com areia de rio verifica-se o contrário, embora os valores das últimas são muito próximos.

A figura 3.17 traduz a comparação dos valores do coeficiente de absorção capilar das argamassas com e sem introdutor de ar.

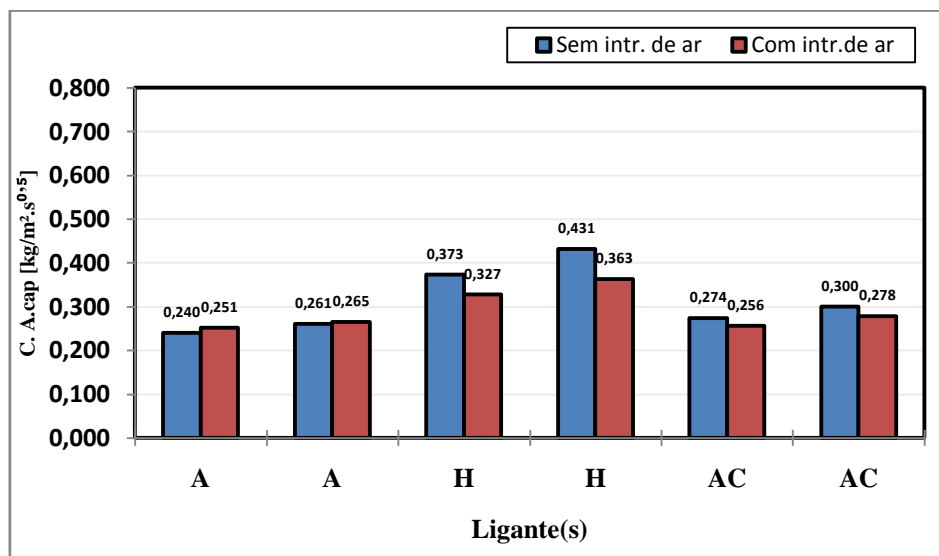


Figura 3.17 – Comparação dos valores do coeficiente de absorção capilar das argamassas com e sem introdutor de ar. A – cal aérea; H – cal hidráulica; AC – cal aérea + cimento

O efeito do introdutor de ar no coeficiente de absorção capilar foi o esperado nas argamassas com ligantes hidráulicos, isto é, verificou-se a diminuição deste coeficiente.

São confirmadas assim as afirmações contidas na ficha técnica do produto relativas à absorção capilar. As argamassas de cal aérea, com valores idênticos com e sem utilização do introdutor de ar, indiciam a ineficácia deste em relação a esta característica.

3.8 Ciclos gelo/degelo

O ensaio de ciclos gelo/degelo permite avaliar a perda de massa dos provetes ao longo de cada ciclo verificando-se, assim, uma forma gradual de caracterizar a acção que a congelação/descongelação tem nas diferentes argamassas. Este é, naturalmente, o ensaio que melhor caracteriza o comportamento de argamassas em climas frios.

Os quadros de valores dos coeficientes comparativos e respectivos gráficos correspondentes aos 10, 20 e 40 ciclos aos quais a análise seguinte fará referência sempre que necessário encontram-se no anexo 2. Estes gráficos servirão posteriormente para comparação de outras características e/ou comportamentos.

As figuras 3.18, 3.21 e 3.25 mostram graficamente a percentagem de massa perdida ao longo dos ciclos gelo/degelo em argamassas com e sem introdutor de ar. Estes resultados estão organizados por argamassas com o mesmo tipo de ligante, variando o tipo de areia. A informação relativa às argamassas com introdutor de ar é pormenorizada na figura 3.28.

De forma a ser feita uma comparação visual entre os provetes com e sem introdutor de ar, as figuras relativas a argamassas sem introdutor de ar 3.20, 3.24 e 3.26 podem ser comparadas com as figuras 3.29, 3.30 e 3.31 de constituição semelhante mas com o uso deste componente.

3.8.1 Argamassas de cal aérea

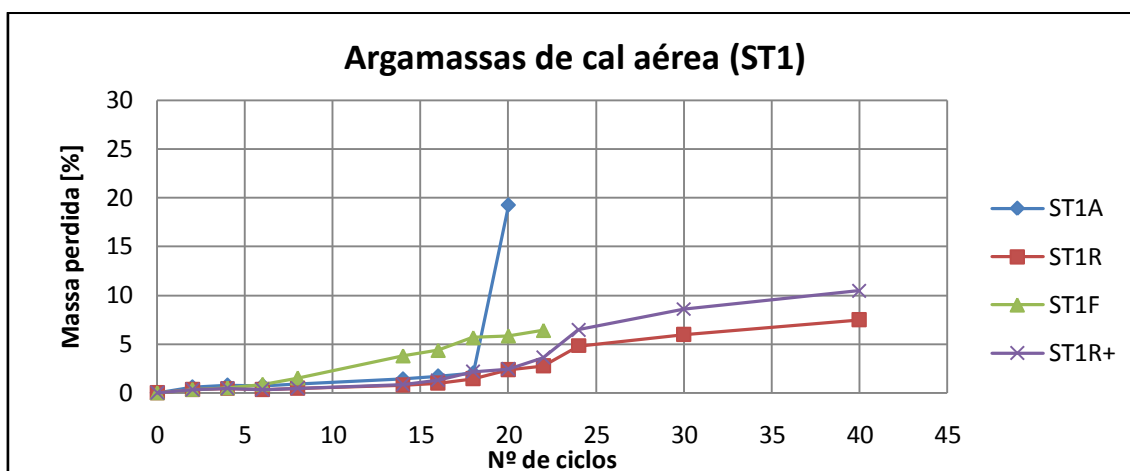
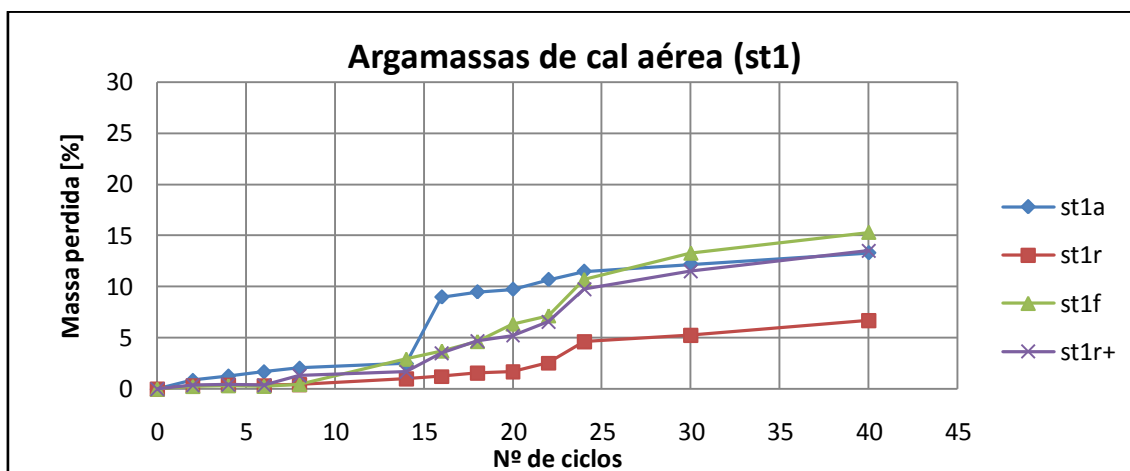


Figura 3.18 – Massa perdida ao longo dos ciclos gelo/degelo em argamassas de cal aérea. st1 – argamassa com menor quantidade de água; ST1 – argamassa com maior quantidade de água

Através da análise da figura 3.18 pode verificar-se que as argamassas de cal aérea com areia AGS 1/2 e FPS 120 e menor quantidade de água têm um comportamento semelhante. As argamassas com areia AGS 1/2 com maior quantidade de água atingiram 20 ciclos em condições de ensaio e as argamassas com areia FPS 120 e maior quantidade de água atingiram 22 ciclos em condições de ensaio²². A figura 3.19 mostra a evolução visual de um provete de argamassa de cal aérea com areia FPS 120 e maior quantidade de água. Os provetes com areia de rio foram os que perderam uma menor

²² - Os provetes deixam de estar em condições de ensaio quando se encontram com uma desintegração extrema, as condições desta desintegração encontram-se dispostas no capítulo 2.7.9.

quantidade de massa e apresentam valores semelhantes com diferentes quantidades de água, o que quer dizer que, ao contrário das argamassas com as outras areias, a quantidade de água não exerceu influência nesta argamassa. A figura 3.20 mostra a evolução visual de um provete de argamassa de cal aérea com areia de rio e menor quantidade de água.

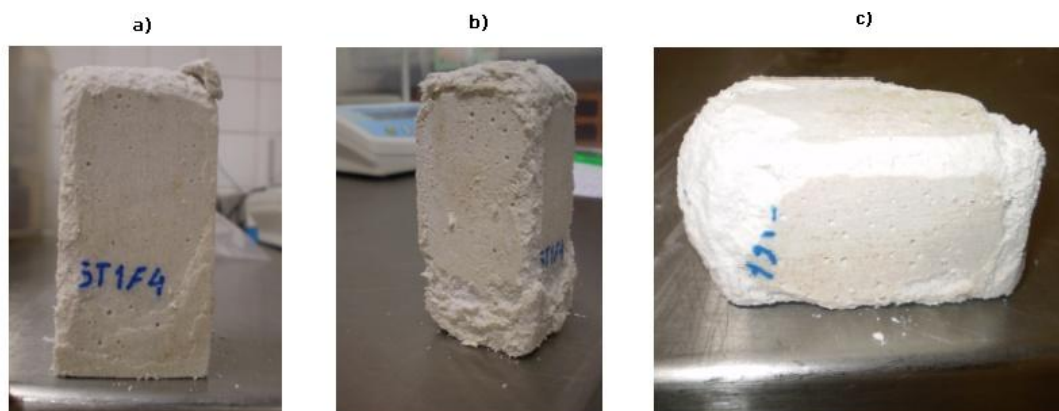


Figura 3.19 – Evolução visual de um provete de cal aérea com areia FPS 120 e maior quantidade de água decorridos: a) 10 ciclos gelo/degelo; b) 20 ciclos gelo/degelo; c) 22 ciclos gelo/degelo

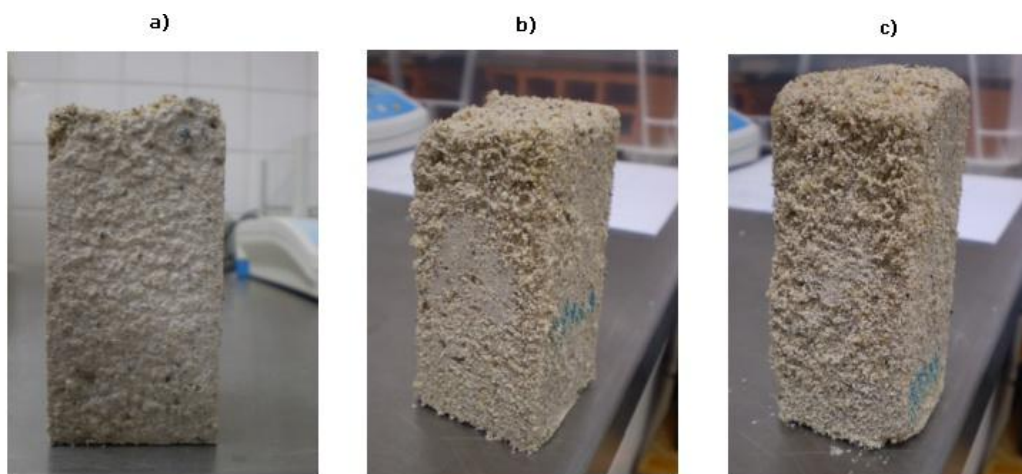


Figura 3.20 – Evolução visual de um provete de cal aérea com areia de rio e menor quantidade de água decorridos: a) 10 ciclos gelo/degelo; b) 20 ciclos gelo/degelo; c) 40 ciclos gelo/degelo

3.8.2 Argamassas de cal hidráulica

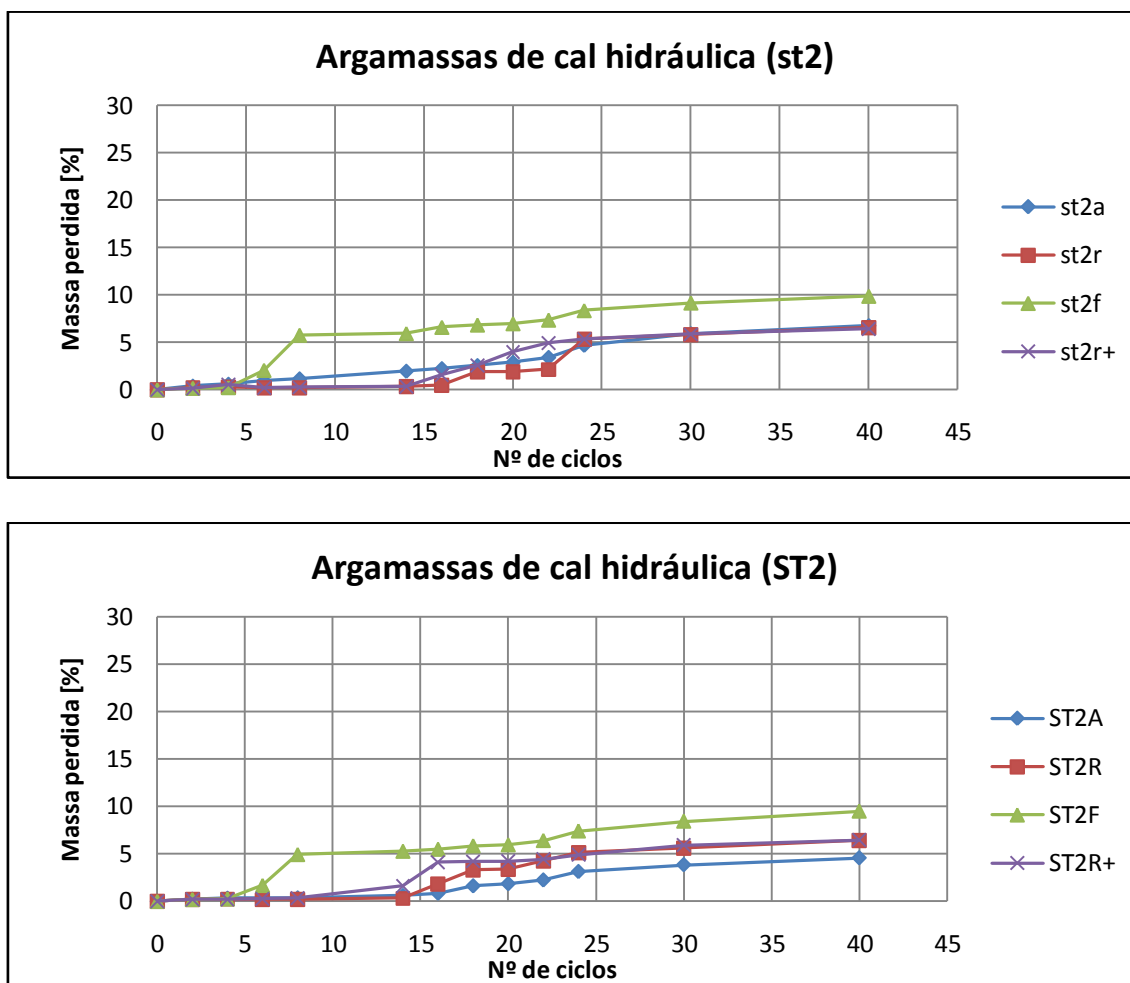


Figura 3.21 – Massa perdida ao longo dos ciclos gelo/degelo em argamassas de cal hidráulica. st2 – argamassa com menor quantidade de água; ST2 – argamassa com maior quantidade de água

A figura 3.21 mostra uma uniformidade de comportamento à acção dos ciclos gelo/degelo por parte de todas as argamassas. Numa fase inicial, a massa perdida é mínima, sendo que só começa a verificar-se maior perda geralmente quando o ensaio atinge 14 ciclos. A excepção a esta tendência é verificada nas argamassas com areia FPS 120. Estas argamassas apresentam uma perda de massa significativa entre os 5 e os 8 ciclos originando um declive mais acentuado na figura. Esta perda tem origem no destaque de uma “placa” fina (figura 3.22) de material do provete numa das suas maiores superfícies. A justificação deste destaque parece estar relacionada com um aspecto observado em todos os provetes: o destaque verificado ocorreu na superfície superior de

moldagem dos provetes; deste modo, julga-se que a maior concentração de calda de ligante, resultante do processo de compactação, tenha originado uma fina camada de material menos coeso. À passagem dos 10 e dos 20 ciclos, a massa perdida apresenta valores semelhantes mas com as argamassas com areia de rio sempre acima dos valores das restantes. Decorridos 40 ciclos, verifica-se uma perda entre sensivelmente os 5% e os 10% em todas as argamassas, o que vem confirmar a uniformidade de comportamento das argamassas com o ligante cal hidráulica. As diferentes quantidades de água não tiveram influência no comportamento das argamassas. A figura 3.23 mostra a evolução visual de um provete de cal hidráulica com areia AGS 1/2 e maior quantidade de água e a figura 3.24 a evolução visual de um provete de cal hidráulica com areia de rio e menor quantidade de água.

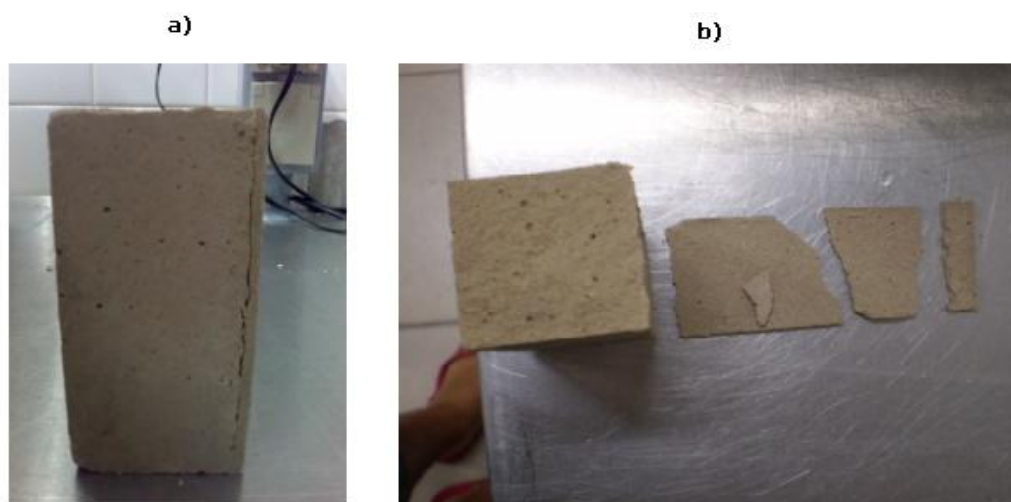


Figura 3.22 – Queda da “placa” da superfície de um provete de cal hidráulica com areia FPS 120. a) vista de perfil do provete mostrando a fissura vertical do provete (imagem registada decorridos 4 ciclos gelo/degelo); b) vista de planta do provete após a queda da “placa”(imagem registada decorridos 6 ciclos gelo/degelo)

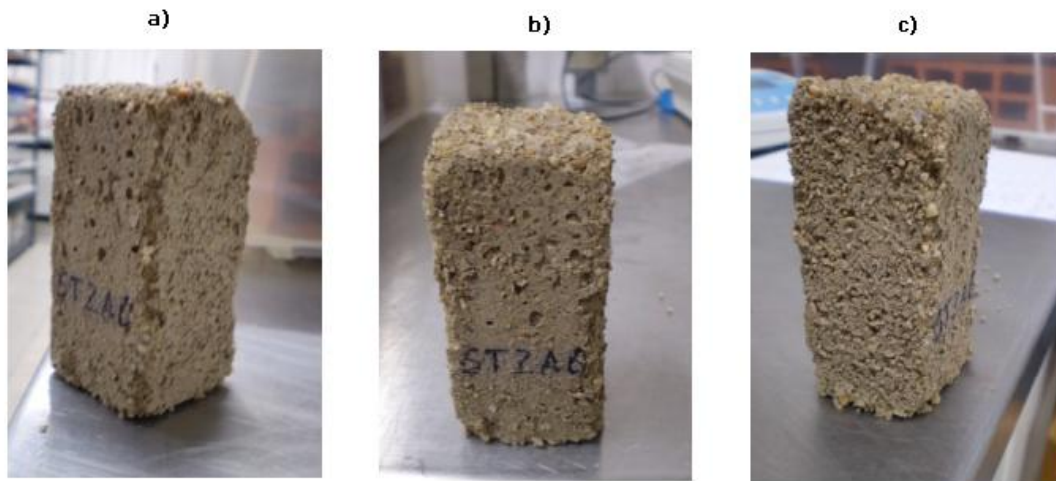


Figura 3.23 – Evolução visual de um provete de cal hidráulica com areia AGS 1/2 e maior quantidade de água decorridos: a) 10 ciclos gelo/degelo; b) 20 ciclos gelo/degelo; c) 40 ciclos gelo/degelo

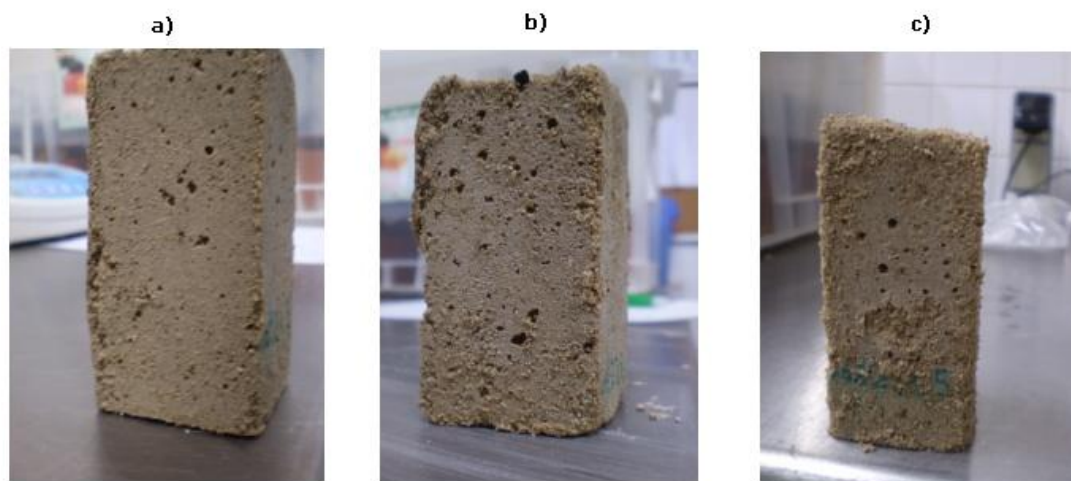


Figura 3.24 – Evolução visual de um provete de cal hidráulica com areia de rio e menor quantidade de água decorridos: a) 10 ciclos gelo/degelo; b) 20 ciclos gelo/degelo; c) 40 ciclos gelo/degelo

3.8.3 Argamassas de cal aérea + cimento

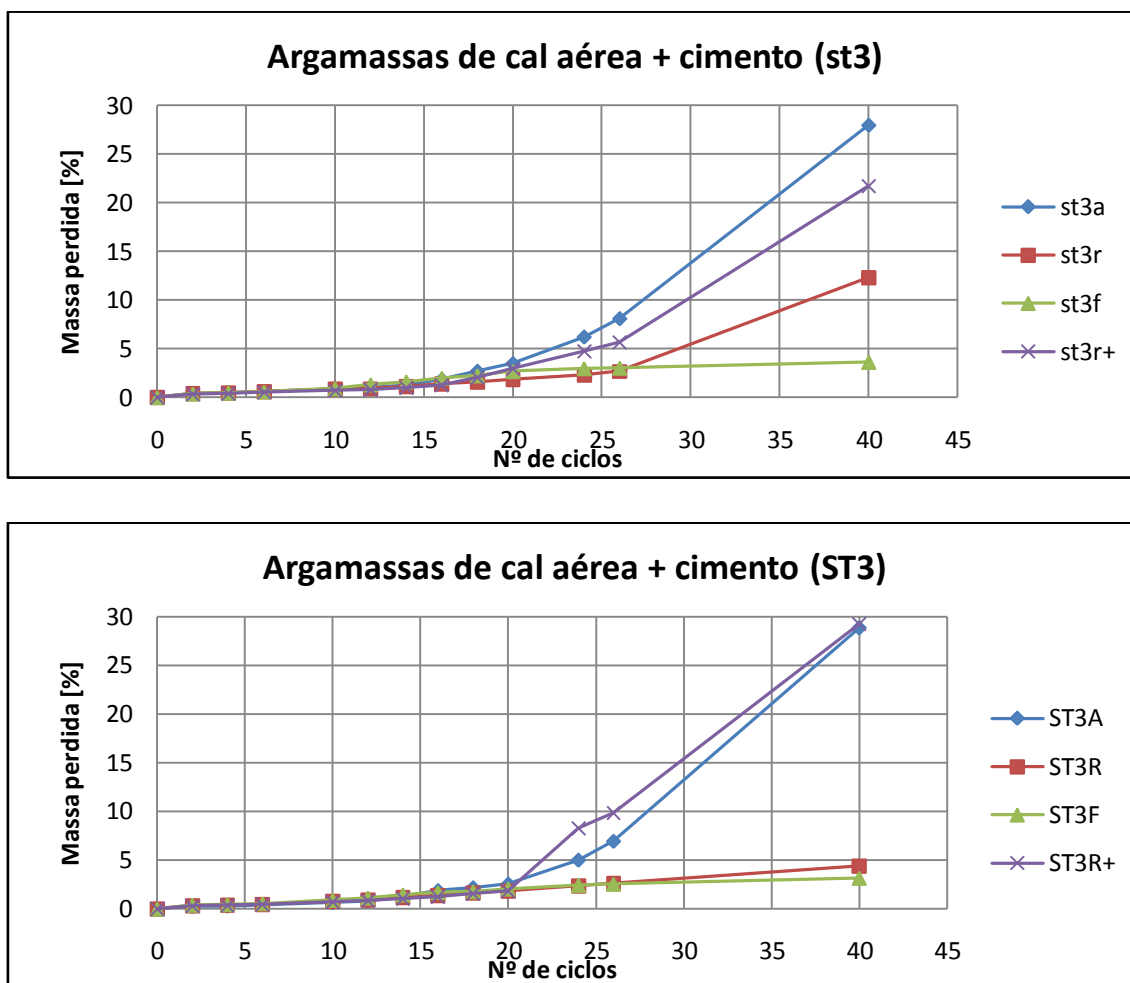


Figura 3.25 – Massa perdida ao longo dos ciclos gelo/degelo em argamassas de cal aérea + cimento. st3 – argamassa com menor quantidade de água; ST3 – argamassa com maior quantidade de água

A análise da figura 3.25 revela um comportamento excelente por parte de todas as argamassas de cal aérea + cimento até aos 20 ciclos gelo/degelo, não tendo nenhuma das argamassas ultrapassado uma perda superior a 1% decorridos 10 ciclos gelo/degelo e superior a 3,5% decorridos 20 ciclos gelo/degelo. As argamassas com areia FPS 120 e menor quantidade de água e as argamassas com areia de rio e areia FPS 120 e maior quantidade de água mantiveram a boa performance com perdas de massa aos 40 ciclos inferiores a 5% da massa inicial. As argamassas com areia de rio e menor quantidade de água decorridos 40 ciclos perderam cerca de 12% da massa inicial. O pior comportamento com este tipo de ligante verificou-se com a areia AGS 1/2 e com o uso

do introdutor de ar. A figura 3.26 mostra a evolução visual de um provete de cal aérea + cimento com areia de rio e menor quantidade de água. De modo a ser feita uma comparação visual entre o nível de deterioração de um provete pouco alterado (figura 3.26) com um provete com alto nível de deterioração é apresentada a figura 3.27 que corresponde a um provete de uma argamassa de cal aérea + cimento com areia AGS 1/2 e menor quantidade de água.

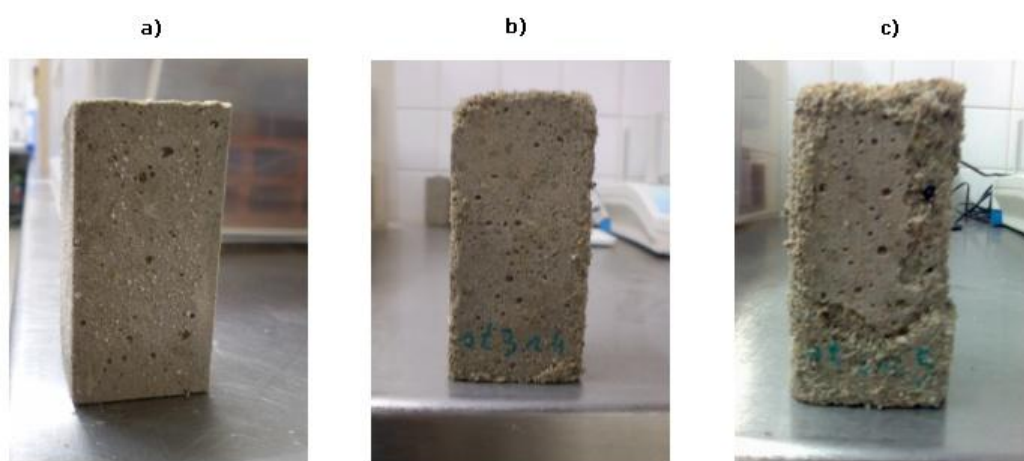


Figura 3.26 – Evolução visual de um provete de cal aérea + cimento com areia de rio e menor quantidade de água decorridos: a) 10 ciclos gelo/degelo; b) 20 ciclos gelo/degelo; c) 40 ciclos gelo/degelo

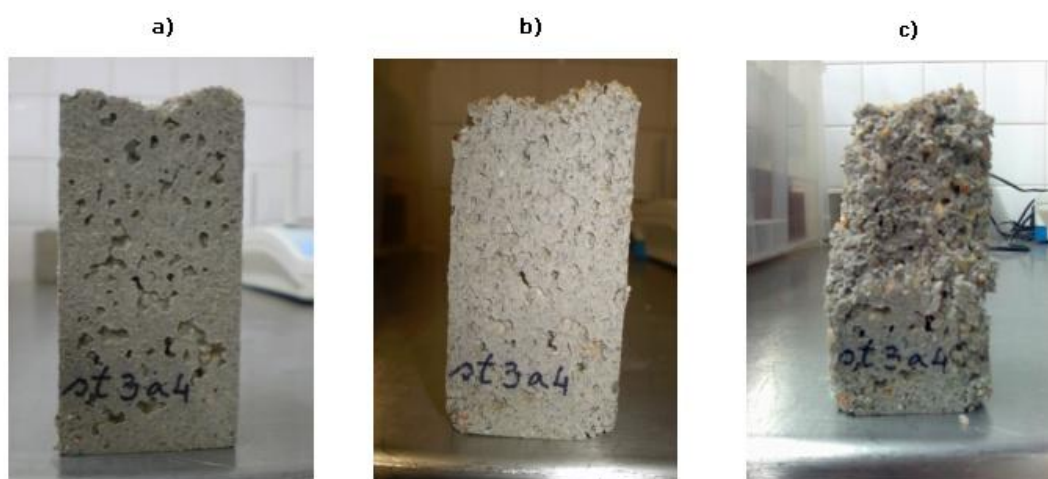


Figura 3.27 – Evolução visual de um provete de cal aérea + cimento com areia AGS 1/2 e menor quantidade de água decorridos: a) 10 ciclos gelo/degelo; b) 20 ciclos gelo/degelo; c) 40 ciclos gelo/degelo

3.8.4 Argamassas com introdutor de ar

A figura 3.28 representa a comparação entre os índices de degradação das argamassas com areia de rio com e sem introdutor de ar.

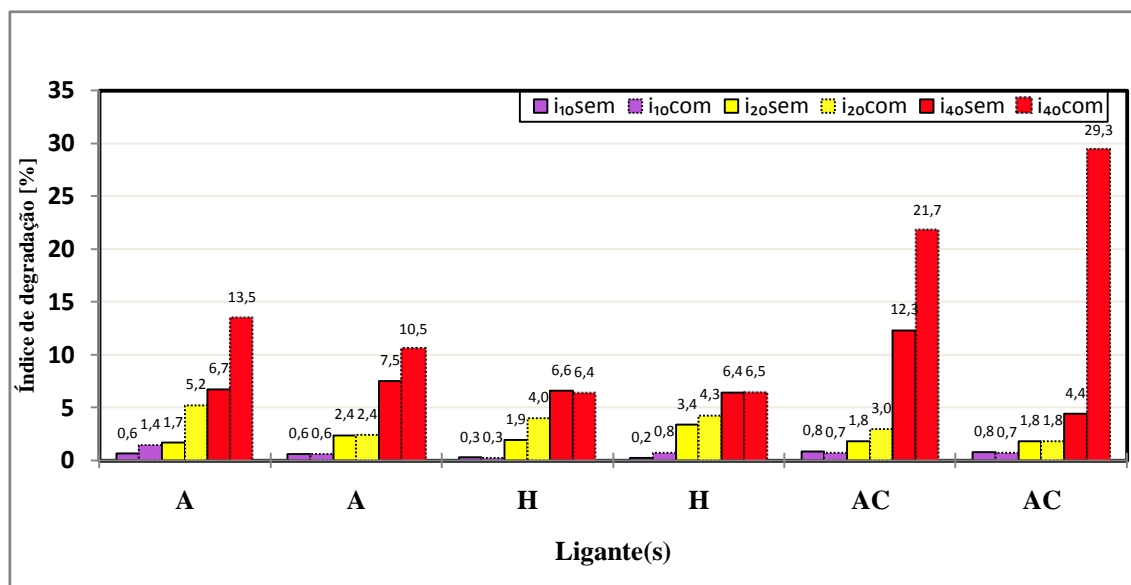


Figura 3.28 – Índices de degradação das argamassas com areia de rio com e sem introdutor de ar. A – cal aérea; H – cal hidráulica; AC – cal aérea + cimento; i₁₀ - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i₂₀ - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i₄₀ - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo; sem – designação para argamassas sem introdutor de ar; com – designação para argamassas com introdutor de ar

A figura 3.28 mostra que, decorridos 10 ciclos, as diferenças na perda de massa são mínimas comparando argamassas com e sem introdutor de ar. Decorridos 20 ciclos já se notam algumas diferenças, estas com tendência contrária à esperada, já que a maioria dos provetes com introdutor de ar neste ponto de ensaio apresenta uma quantidade maior de massa perdida em relação àqueles em que não foi utilizado o adjuvante. Esta tendência é confirmada decorridos 40 ciclos nas argamassas de cal aérea e cal aérea + cimento. Nas argamassas de cal hidráulica verificam-se valores de perda de massa semelhantes decorridos 40 ciclos e a diferença verificada nos provetes com menor quantidade de água aos 20 ciclos é devida, como confirma o desvio padrão (figura... do anexo 2), a um comportamento diferenciado de um dos provetes de ensaio. A justificação para o comportamento diferenciado entre as argamassas com e sem ligante

aéreo, parece estar na natureza do introdutor de ar e o tipo de ligante para o qual este é destinado²³.

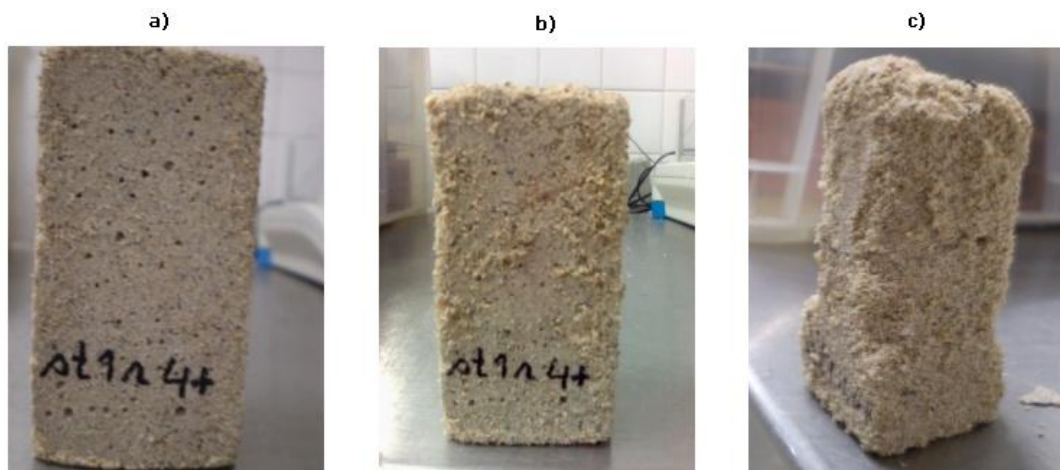


Figura 3.29 – Evolução visual de um provete de cal aérea com areia de rio e menor quantidade de água com introdutor de ar decorridos: a) 10 ciclos gelo/degelo; b) 20 ciclos gelo/degelo; c) 40 ciclos gelo/degelo

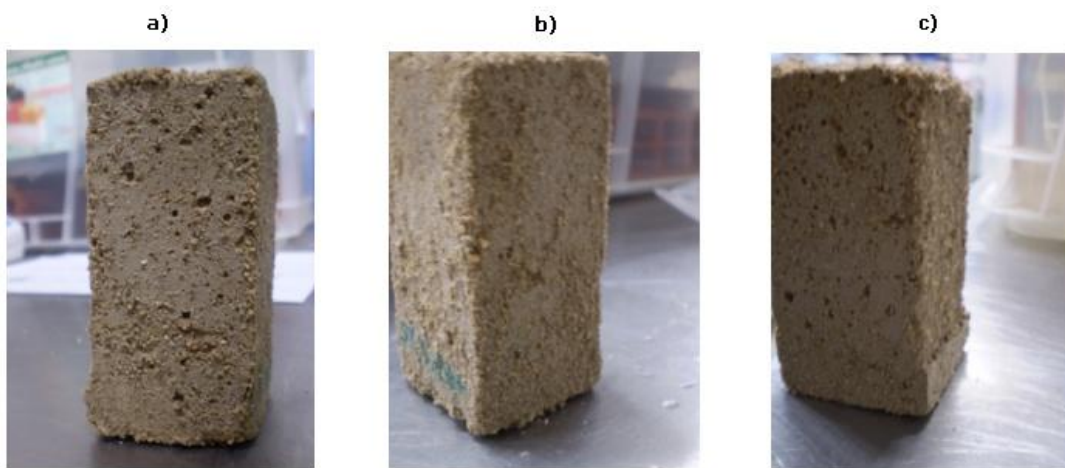


Figura 3.30 – Evolução visual de um provete de cal hidráulica com areia de rio e menor quantidade de água com introdutor de ar decorridos: a) 10 ciclos gelo/degelo; b) 20 ciclos gelo/degelo; c) 40 ciclos gelo/degelo

²³ - Este assunto está pormenorizadamente explanado no sub-capítulo 4.1.4.

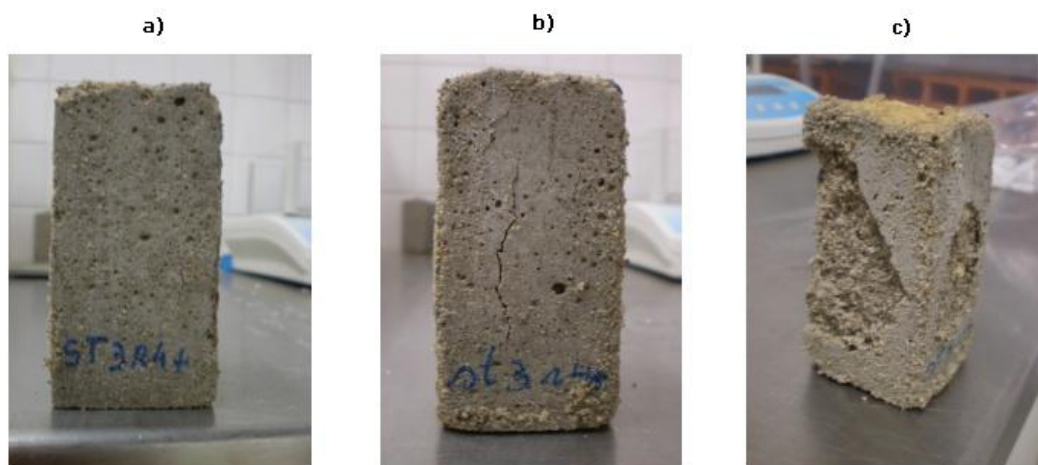


Figura 3.31 – Evolução visual de um provete de cal aérea + cimento com areia de rio e menor quantidade de água com introdutor de ar decorridos: a) 10 ciclos gelo/degelo; b) 20 ciclos gelo/degelo; c) 40 ciclos gelo/degelo

3.9 Síntese

Quantidade de água/espalhamento

A quantidade de água necessária à obtenção de um determinado espalhamento aumenta à medida que o diminui a granulometria da areia. O introdutor de ar faz aumentar a trabalhabilidade de todas as argamassas.

Porosidade aberta

Por ordem crescente de porosidade apresentam-se as argamassas de cal aérea + cimento, cal hidráulica e cal aérea. Os valores de porosidade dos diferentes tipos de ligante com a mesma areia são muito semelhantes. A porosidade aumenta com a diminuição da granulometria do agregado. Existe uma tendência de manutenção ou ligeiro aumento da porosidade com o aumento de água na argamassa; porém, sendo esta tendência muito ténue, não se podem tirar conclusões significativas sobre este aspecto. A utilização do introdutor de ar nas argamassas faz aumentar ligeiramente a sua porosidade. Era esperado um aumento de maior grandeza. A explicação para esta possível aproximação de valores parece estar maioritariamente relacionada com a natureza e especificações do

introdutor de ar e com a operação de compactação. A operação de compactação parece ser, também, a razão da aproximação de valores com diferentes quantidades de água.

Resistências mecânicas

As argamassas de cal aérea + cimento apresentam os maiores valores em termos de resistências mecânicas à tracção por flexão e à compressão, seguidos das argamassas de cal aérea e cal hidráulica, respectivamente. A explicação para os maiores valores das argamassas de cal aérea em relação às de cal hidráulica parece encontrar-se no traço. Em relação ao tipo de areias, nota-se um aumento da resistência à tracção por flexão com a diminuição da dimensão do agregado. Em relação à quantidade de água, verifica-se a tendência de diminuição das resistências mecânicas com o aumento de água na argamassa. A utilização do introdutor de ar, como esperado, resulta numa ligeira redução dos valores da resistência à tracção por flexão. O uso deste componente, no ensaio de resistência à compressão, exibiu resultados surpreendentes já que, na maioria das argamassas, não exerceu qualquer tipo de influência e, em algumas delas, até melhorou esta propriedade.

Módulo de elasticidade dinâmico

As argamassas de cal aérea são as que apresentam os valores mais baixos do módulo de elasticidade, pelo que estas são as mais deformáveis. A adição de cimento à cal aérea faz aumentar os valores do módulo de elasticidade dinâmico. As argamassas de cal hidráulica têm um comportamento intermédio. A dimensão das partículas da areia influi de maneira diferente de acordo com o ligante. Nas argamassas de cal aérea verifica-se a subida do módulo de elasticidade dinâmico, as argamassas de cal hidráulica apresentam valores relativamente constantes e a tendência é de descida nas argamassas de cal aérea + cimento. O aumento de água em argamassas com constituição semelhante faz baixar, de uma forma geral, o módulo de elasticidade dinâmico. Os valores do módulo de elasticidade baixam com a utilização do introdutor de ar.

Difusão do vapor de água

As argamassas que atingiram, em primeiro lugar, o regime constante de fluxo de vapor de água foram as bastardas, sendo seguidas pelas argamassas de cal aérea e hidráulica. A diminuição da granulometria da areia mostra uma tendência de subida do coeficiente de difusão de vapor de água. Em relação à quantidade de água na argamassa, a tendência é de aumento do coeficiente de difusão com o aumento da quantidade de água. O uso do introdutor de ar nas argamassas origina um aumento do coeficiente de difusão de vapor de água. Estes resultados devem ser analisados com reservas devido aos problemas decorridos no ensaio atrás referidos.

Secagem de argamassas

As argamassas de cal aérea são as que apresentam maiores valores de índice de secagem e as argamassas de cal aérea + cimento os menores, sendo a diferença significativa. De acordo com o tipo de areia verifica-se que, nas argamassas de cal aérea e de cal hidráulica, o índice de secagem aumenta com a diminuição da granulometria da areia. As argamassas de cal aérea + cimento apresentam valores muito próximos com as diferentes areias. O índice de secagem nas argamassas de cal aérea e de cal hidráulica apresenta uma tendência de subida com o aumento da água de amassadura. As argamassas de cal aérea + cimento, à semelhança da análise em relação ao tipo de agregado, apresentam valores muito próximos com diferentes quantidades de água. Nas argamassas de cal aérea e de cal hidráulica a utilização do introdutor de ar faz baixar o índice de secagem. As argamassas de cal aérea + cimento apresentam a tendência inversa. Alguns problemas ocorridos durante o ensaio aconselham reservas nesta análise.

Absorção de água por capilaridade

Valor assintótico de absorção capilar

As argamassas de cal aérea apresentam uma menor dispersão nos valores assintóticos de absorção em relação às outras argamassas. As argamassas de cal hidráulica apresentam uma cinética de absorção mais linear. A diminuição da granulometria da areia resulta em maiores valores de absorção de água por capilaridade. Um aumento de água nas argamassas traduz um maior valor assintótico de absorção. O valor assintótico de absorção capilar geralmente desce com a utilização do introdutor de ar nas argamassas. No caso das argamassas de cal aérea os valores são muito próximos, não se podendo, portanto, tirar qualquer conclusão.

Coefficiente de absorção de água por capilaridade

As argamassas de cal hidráulica apresentam os mais elevados de coeficiente de absorção de água por capilaridade. Nas argamassas com ligantes hidráulicos, a diminuição da granulometria da areia resulta num aumento do coeficiente de absorção capilar. As argamassas de cal aérea apresentam tendência contrária. As argamassas com ligantes hidráulicos apresentam uma tendência de subida nos valores do coeficiente de absorção capilar com o aumento de água de amassadura. De novo, as argamassas de cal aérea mostram tendência contrária. Nas argamassas com ligantes hidráulicos, os valores de coeficiente de absorção capilar das argamassas com introdutor de ar é inferior e nas argamassas de cal aérea não se verificaram diferenças significativas.

Ciclos gelo/degelo

As argamassas de cal aérea têm comportamentos diversos consoante os seus componentes. As argamassas com este tipo de ligante e areia de rio são as que apresentam melhor comportamento²⁴, semelhante, neste caso, para as duas quantidades de água. As outras areias deram origem a argamassas com comportamentos semelhantes entre si, piores que com areia de rio. Nestas argamassas, a maior quantidade de água originou a conclusão do ensaio antes dos 40 ciclos.

²⁴ - Entenda-se melhor comportamento com menor perda de massa.

As argamassas de cal hidráulica são as que apresentam uma maior homogeneidade de comportamento. As diferentes quantidades de água não tiveram influência no comportamento das argamassas. Verifica-se a tendência geral de pior comportamento com a diminuição da granulometria do agregado.

Os provetes de cal aérea + cimento com areia AGS1/2, apesar de até aos 20 ciclos revelarem um bom comportamento, são os que perderam maior quantidade de material aos 40 ciclos. Nas argamassas com areia de rio uma menor quantidade de água está associada a uma maior perda de massa. As argamassas com cal aérea + cimento e areia FPS 120 foram as que revelaram ter um melhor comportamento aos ciclos gelo/degelo de todas as combinações ensaiadas.

Na generalidade das argamassas, decorridos 20 ciclos desde o início do ensaio, as argamassas com introdutor de ar não parecem ter um comportamento muito diferente. Aos 40 ciclos estabelecem-se duas tendências distintas. Nas argamassas com ligante aéreo, o introdutor de ar piora o comportamento, enquanto que nas de cal hidráulica este componente não introduz alterações comportamentais nas argamassas.

4. Análise relacional

A análise relacional tem como objectivo, de acordo com os constituintes das argamassas, relacionar as suas características de modo a estabelecer tendências e identificar diferentes comportamentos. As características porosidade e resistências mecânicas (resistência à tracção por flexão e à compressão), como principais características pela durabilidade das argamassas, foram comparadas com a resistência à acção dos ciclos gelo/degelo, principal mecanismo de degradação em climas frios.

4.1 Porosidade e resistência aos ciclos gelo/degelo

A porosidade é uma característica fundamental das argamassas, da qual depende (embora não exclusivamente) a acção que os mecanismos de degradação por ciclos gelo/degelo exerce e os efeitos que tem na mesma.

As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 relacionam a porosidade e a resistência aos ciclos gelo/degelo das argamassas. Os resultados estão agrupados por ligante e quantidade de água de amassadura semelhante. Os resultados das argamassas com introdutor de ar (figura 4.4, 4.5 e 4.6) estão agrupados por ligante semelhante.

4.1.1 Argamassas de cal aérea

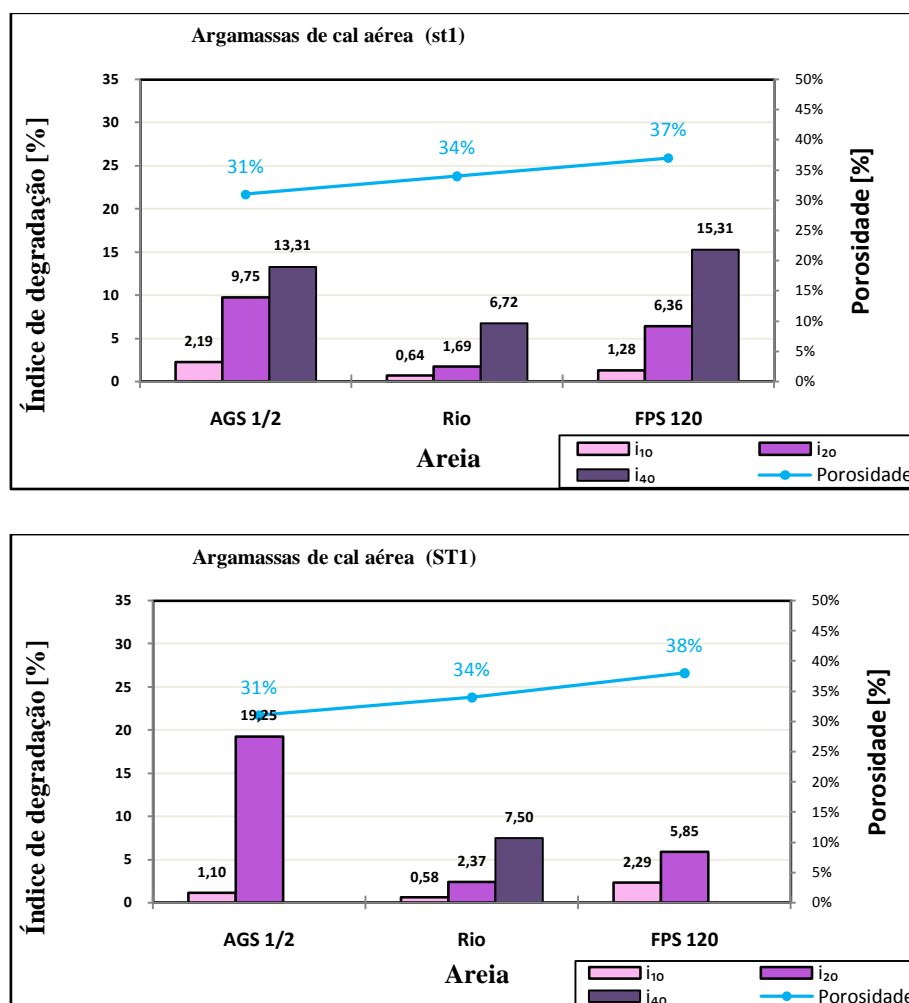


Figura 4.1 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

Através da análise da figura 4.1 é observado que, com menor quantidade de água, a maior porosidade das argamassas com areia FPS 120 faz baixar o índice de degradação em relação às argamassas com areia AGS 1/2 decorridos 10 e 20 ciclos e baixar o índice decorridos 40 ciclos. As argamassas com maior quantidade de água com areia AGS 1/2 e FPS 120 não apresentam nenhuma tendência, sendo observado que, ambas, com valores de porosidade diferentes não completaram os 40 ciclos gelo/degelo. As argamassas com areia de rio são as que apresentam melhor comportamento ao gelo/degelo. Estas argamassas têm valores intermédios de porosidade entre as argamassas com as outras areias e apresentam melhor comportamento, o que leva a crer que, em

argamassas de cal aérea, outros aspectos influem na resistência aos ciclos gelo/degelo que não a porosidade.

A estrutura porosa e a porometria parecem explicar o comportamento das argamassas com areia AGS 1/2 e com areia FPS 120. A areia AGS 1/2 é constituída por grãos de grandes dimensões o que dá origem a fendas de retracção muito significativas, portanto, tal como indicam Lanas e Alvarez [53], fazem perder a coesão do material endurecido. A areia FPS 120 dá origem a poros muito finos, estes fazem diminuir a resistência aos ciclos gelo/degelo. Powers, citado por Chatterji [13], confirma que os poros finos afectam negativamente o comportamento das argamassas à acção dos ciclos gelo/degelo.

4.1.2 Argamassas de cal hidráulica

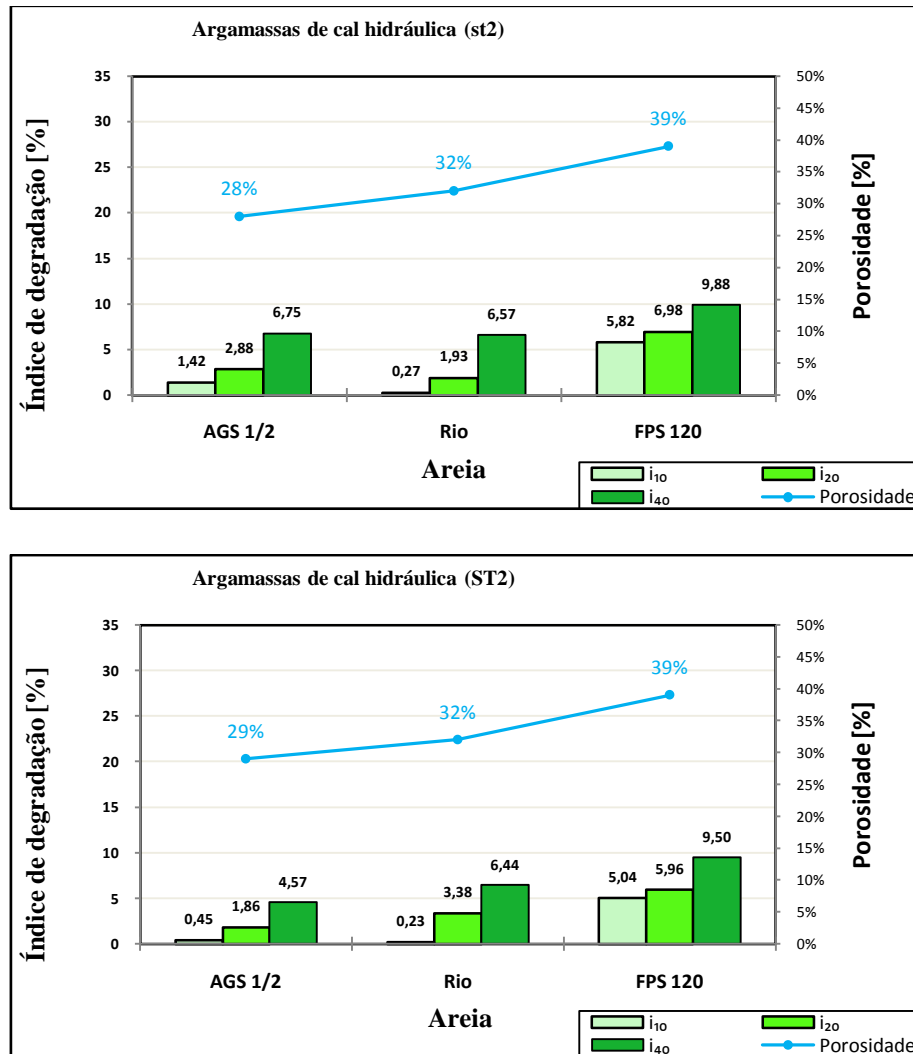


Figura 4.2 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

A figura 4.2 mostra uma tendência clara de subida do índice de degradação com o aumento do valor da porosidade. Esta tendência não se verifica com a argamassa com areia de rio e menor quantidade de água, mas os valores do seu índice de degradação são semelhantes aos da argamassa com areia AGS 1/2. As argamassas com este ligante são as que apresentam uma maior uniformidade comportamental na relação entre porosidade e resistência aos ciclos gelo/degelo.

A porometria parece ter um papel fundamental no comportamento das argamassas de cal hidráulica, visto que neste tipo de argamassas existe uma menor quantidade de

fendas de retracção em relação às argamassas de cal aérea. Apesar da porosidade aumentar, a porometria diminui, o que justifica o comportamento deste tipo de argamassas.

4.1.3 Argamassas de cal aérea + cimento

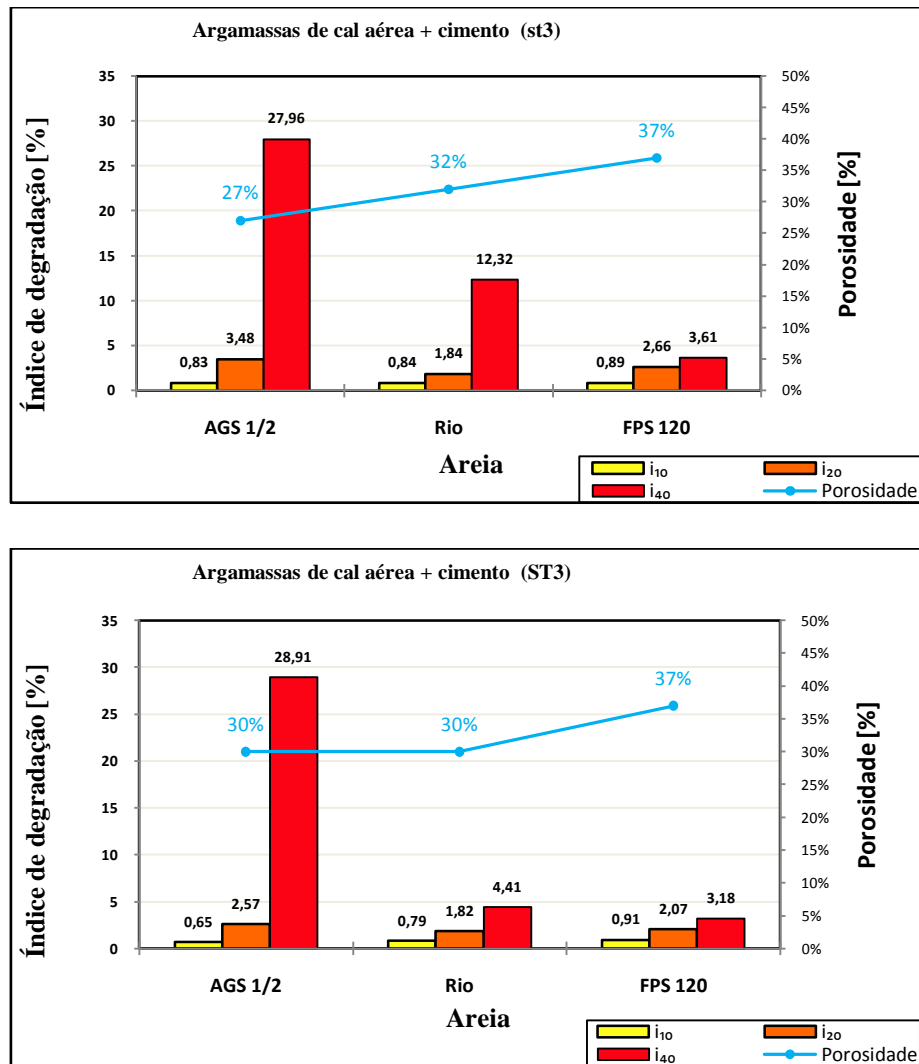


Figura 4.3 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

A análise da figura 4.3 revela que as argamassas de cal aérea + cimento apresentam um comportamento contrário às argamassas de cal hidráulica, o índice de degradação diminui com o aumento da porosidade. As argamassas com areia AGS 1/2 são as que apresentam menor porosidade e maior degradação. É com esta mistura de ligantes que se encontram os melhores comportamentos aos ciclos gelo/degelo, ambas as argamassas

com areia FPS 120 são as que perdem uma menor quantidade de material e possuem um maior valor de porosidade que as demais argamassas com o mesmo tipo de ligante.

As argamassas de cal aérea + cimento apresentam um comportamento contrário às de cal hidráulica, o que deixa antever que, outro factor, as resistências mecânicas, exerça um papel maioritário no que à resistência à acção dos ciclos gelo/degelo diz respeito.

4.1.4 Argamassas com introdutor de ar

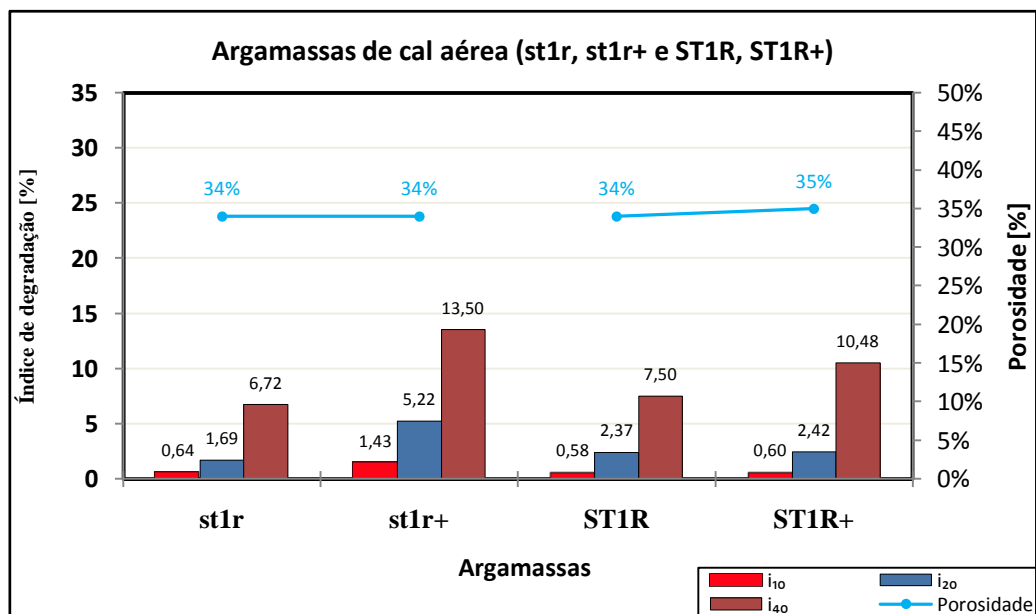


Figura 4.4 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea com e sem introdutor de ar. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

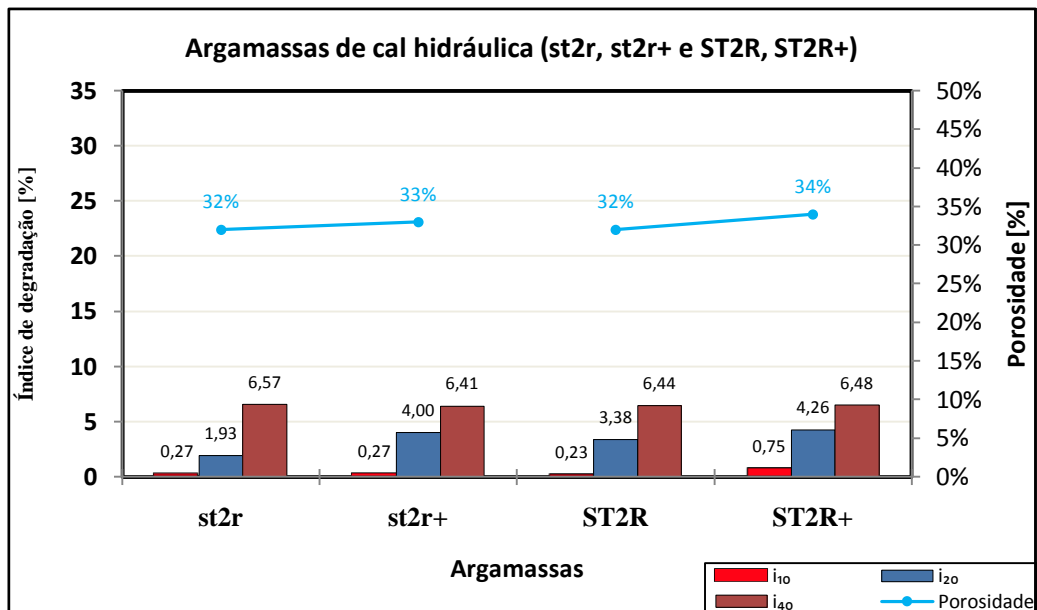


Figura 4.5 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica com e sem introdutor de ar. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

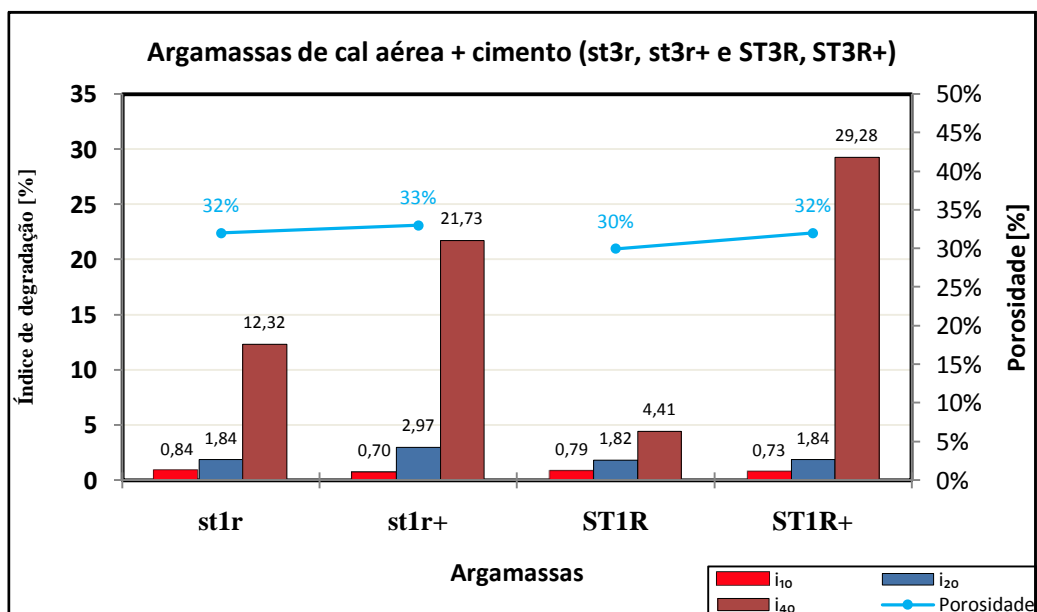


Figura 4.6 – Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento com e sem introdutor de ar. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

Todas as argamassas com introdutor de ar têm uma maior porosidade (embora a diferença não seja muito significativa) que as semelhantes sem o mesmo composto. A exceção é a argamassa de cal aérea com menor quantidade de água. Através da análise

das figuras 4.4, 4.5 e 4.6 são visualizadas duas tendências distintas. As argamassas com ligante aéreo com introdutor de ar têm um maior índice de degradação (com excepção de algumas aos 10 ciclos) em todos os ciclos. Nas argamassas de cal hidráulica o introdutor de ar não afecta o índice de degradação com qualquer quantidade de água.

Os resultados anteriores levam a uma reflexão sobre as propriedades do introdutor de ar e as características internas das argamassas. O factor porosidade parece não ser o que influencia mais directamente o comportamento deste tipo de argamassas à resistência aos ciclos gelo/degelo. Esta assunção é fundamentada pelos diferentes comportamentos das argamassas com o factor comum do aumento da porosidade com o uso do introdutor de ar.

A explicação centra-se não só nas propriedades do introdutor de ar, como nas argamassas para as quais o próprio é destinado. O introdutor de ar (segundo a sua ficha técnica (anexo 1)) destina-se a betões. As argamassas de cal hidráulica deste desenvolvimento experimental endurecem, tal como os betões correntes, por hidratação²⁵ pois o ligante é hidráulico. Estas argamassas são as que possuem uma maior semelhança comportamental expectável com o uso do introdutor de ar, pois são as únicas nas quais este componente não aumenta o coeficiente de degradação calculado ao longo deste trabalho. As argamassas com ligante aéreo com introdutor de ar têm um pior comportamento aos ciclos gelo/degelo que as de composição semelhante sem o mesmo componente. A criação de poros grandes por parte do introdutor de ar poderá afectar, nas argamassas para as quais este não é específico, a estrutura interna das argamassas. Os poros ocupam o espaço que seria ocupado por matriz de ligante na interface ligante-agregado e dificultam essa ligação. Esta assunção poderá ser reforçada com os resultados da relação entre as resistências mecânicas e a resistência aos ciclos gelo/degelo efectuada no subcapítulo seguinte.

²⁵ - As argamassas de cal hidráulica também têm reacções de carbonatação no endurecimento, sendo estas, em percentagem muito menor que as reacções de hidratação.

4.2 Resistências mecânicas e resistência aos ciclos gelo/degelo

As figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.13, 4.14 e 4.15 relacionam a porosidade e a resistência aos ciclos gelo/degelo das argamassas. Os resultados estão agrupados por ligante e quantidade de água de amassadura semelhante. Os resultados das argamassas com introdutor de ar (figura 4.10, 4.11, 4.12, 4.16, 4.17 e 4.18) estão agrupados por ligante semelhante.

4.2.1 Resistência à tracção por flexão

4.2.1.1 Argamassas de cal aérea

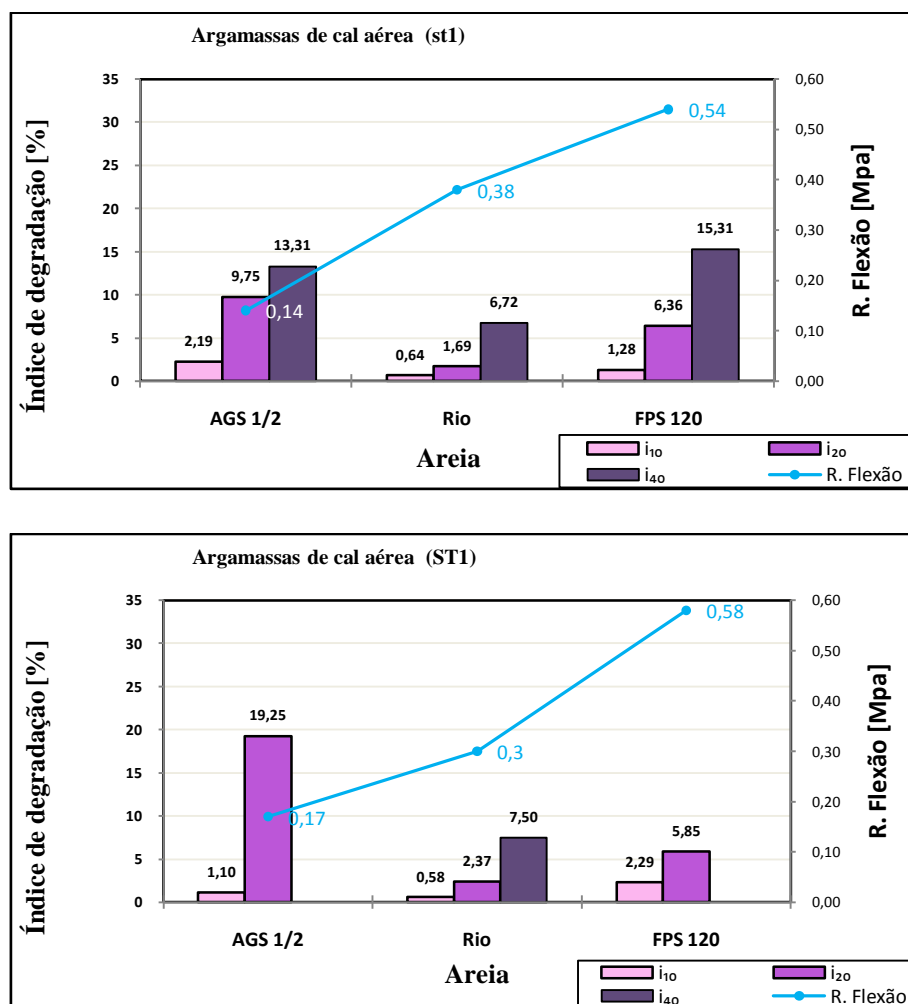


Figura 4.7 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

A argamassa com areia AGS 1/2 e maior quantidade de água suportou 20 ciclos gelo/degelo em condições de ensaio e a argamassa com areia FPS 120 suportou 22 ciclos gelo/degelo em condições de ensaio.

Através da análise da figura 4.7 é concluído que, nas argamassas de cal aérea, não existe uma relação directa entre a resistência à tracção por flexão e a resistência aos ciclos gelo/degelo com estes diferentes tipos de areia. Tome-se o exemplo das argamassas com menor quantidade de água; as argamassas com areia AGS 1/2 são as que apresentam menor resistência à tracção por flexão, seguindo-se em escala ascendente as argamassas com areia de rio e areia FPS 120. O índice de degradação não acompanha esta tendência pois diminui com a areia de rio e aumenta para valor máximo com areia FPS 120.

4.2.1.2 Argamassas de cal hidráulica

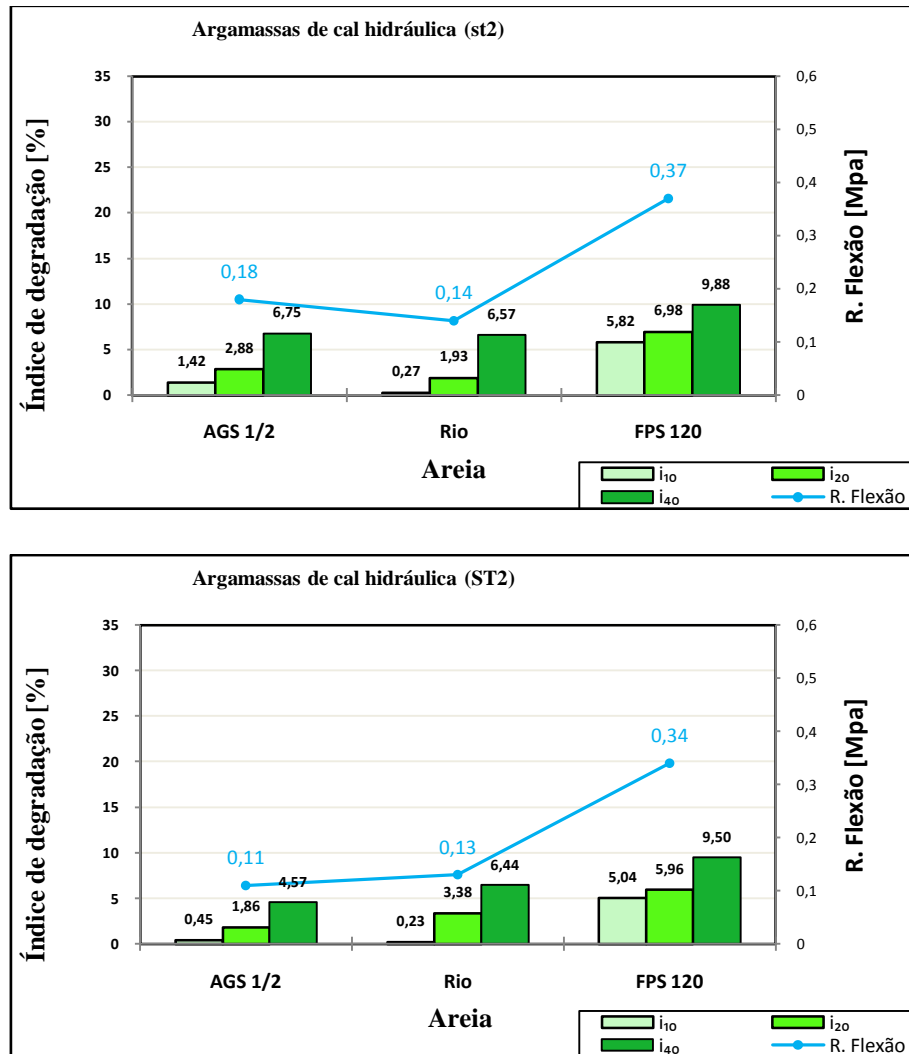


Figura 4.8 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

A figura 4.8 mostra uma relação directa entre o índice de degradação e a resistência à tracção por flexão nas argamassas de cal hidráulica com as duas diferentes quantidades de água. O aumento da resistência à tracção por flexão leva a um aumento do índice de degradação. A excepção verifica-se no caso da argamassa com areia de rio e maior quantidade de água nos 10 ciclos, porém, a ordem de grandeza dos valores leva a que se despreze esta diferença. Tira-se assim a conclusão que, em argamassas de cal hidráulica, não parece haver relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação.

4.2.1.3 Argamassas de cal aérea + cimento

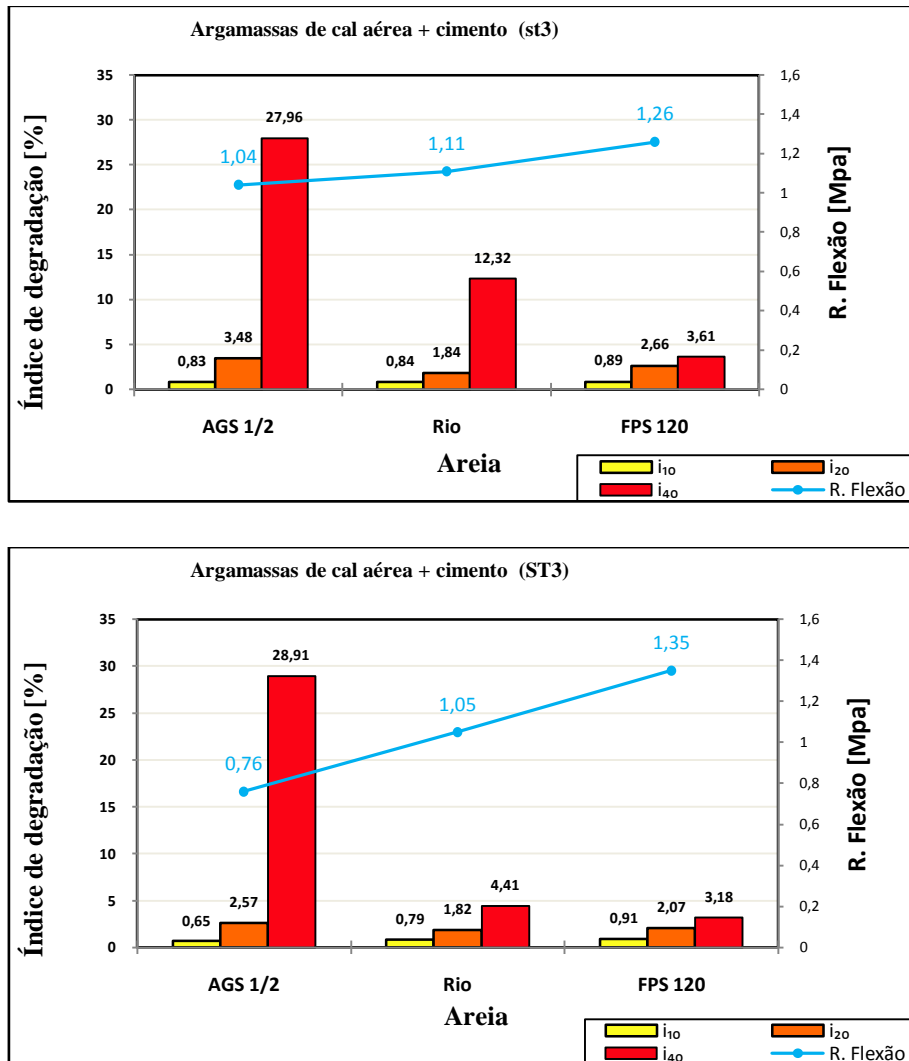


Figura 4.9 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

As argamassas de cal aérea + cimento, através da análise da figura 4.9, apresentam uma relação entre índice de degradação e resistência à flexão contrária às argamassas de cal hidráulica. Ao aumento da resistência à flexão corresponde a diminuição do índice de degradação. No caso do índice aos 20 ciclos, esta relação não se verifica, ficando a curiosidade de o comportamento deste índice ser idêntico ao comportamento demonstrado pelas argamassas de cal aérea. No caso do ligante bastardo, as argamassas com maiores valores de resistência à tracção por flexão são as que melhor se comportam na resistência aos ciclos gelo/degelo.

4.2.1.4 Argamassas com introdutor de ar

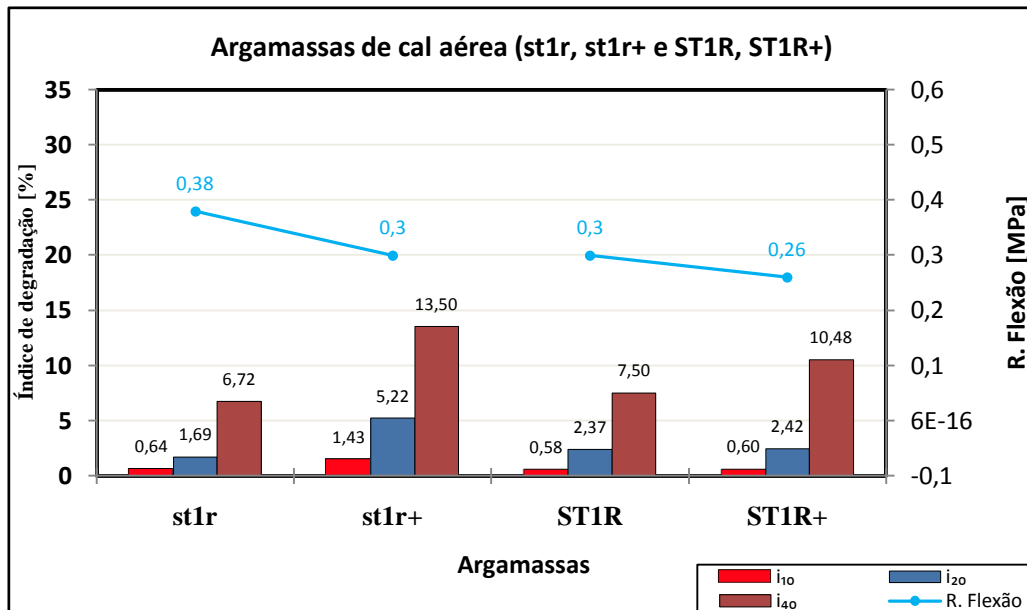


Figura 4.10 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea com e sem introdutor de ar. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

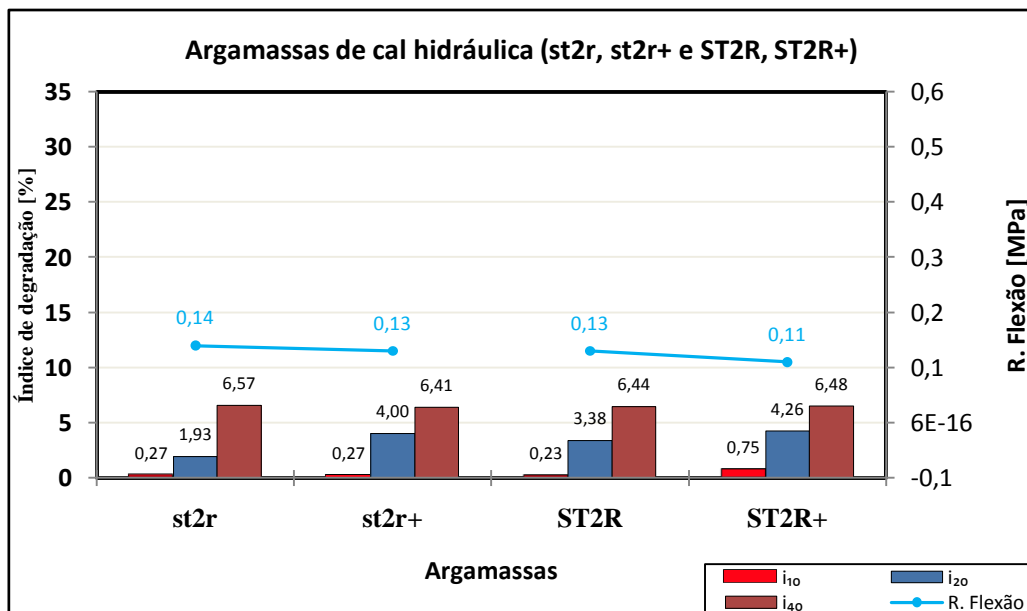


Figura 4.11 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica com e sem introdutor de ar. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

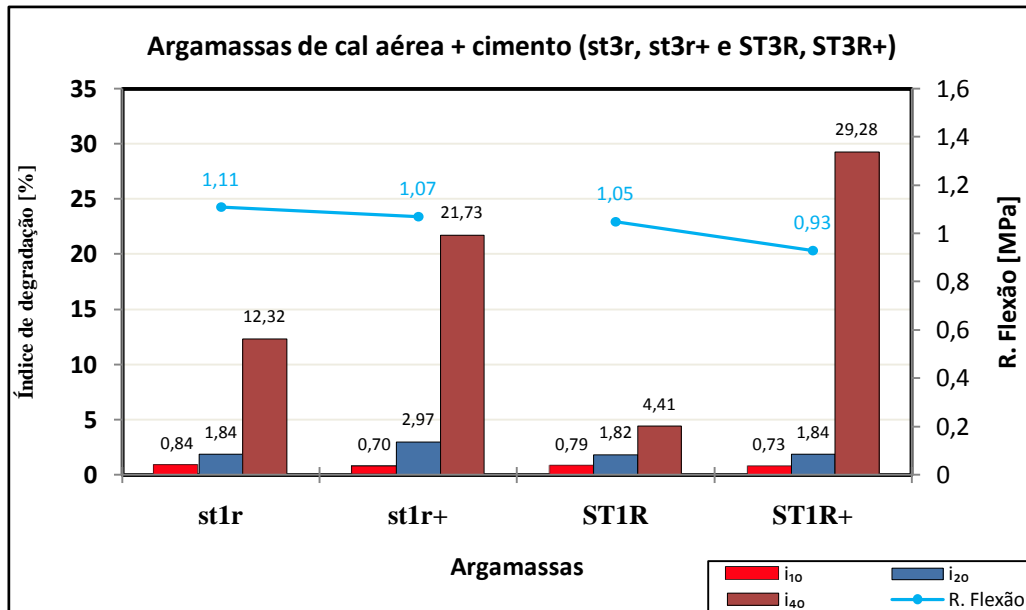


Figura 4.12 – Relação entre a resistência à tracção por flexão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento com e sem introdutor de ar. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

A análise das figuras 4.10, 4.11 e 4.12 permite estabelecer uma relação directa entre o índice de degradação e a resistência à flexão das argamassas com e sem introdutor de ar. Devem distinguir-se dois comportamentos distintos entre as argamassas com ligantes aéreos e de cal hidráulica. Nas argamassas de cal hidráulica verifica-se a constância tanto dos valores do índice de degradação como da resistência à tracção por flexão entre argamassas com e sem introdutor de ar. Nas argamassas com ligante aéreo, o índice de degradação aumenta com a diminuição da resistência à tracção por flexão. Fazendo uma análise cruzada entre este e o subcapítulo 4.1.4 é reforçada a assunção que nesse capítulo foi feita. Nas argamassas com ligante aéreo, os grandes poros poderão ocupar parcialmente o espaço de aderência ligante-agregado, o que diminuirá a resistência mecânica, apesar da porosidade aumentar; assim, o índice de degradação aos ciclos gelo/degelo aumenta.

4.2.2 Resistência à compressão

4.2.2.1 Argamassas de cal aérea

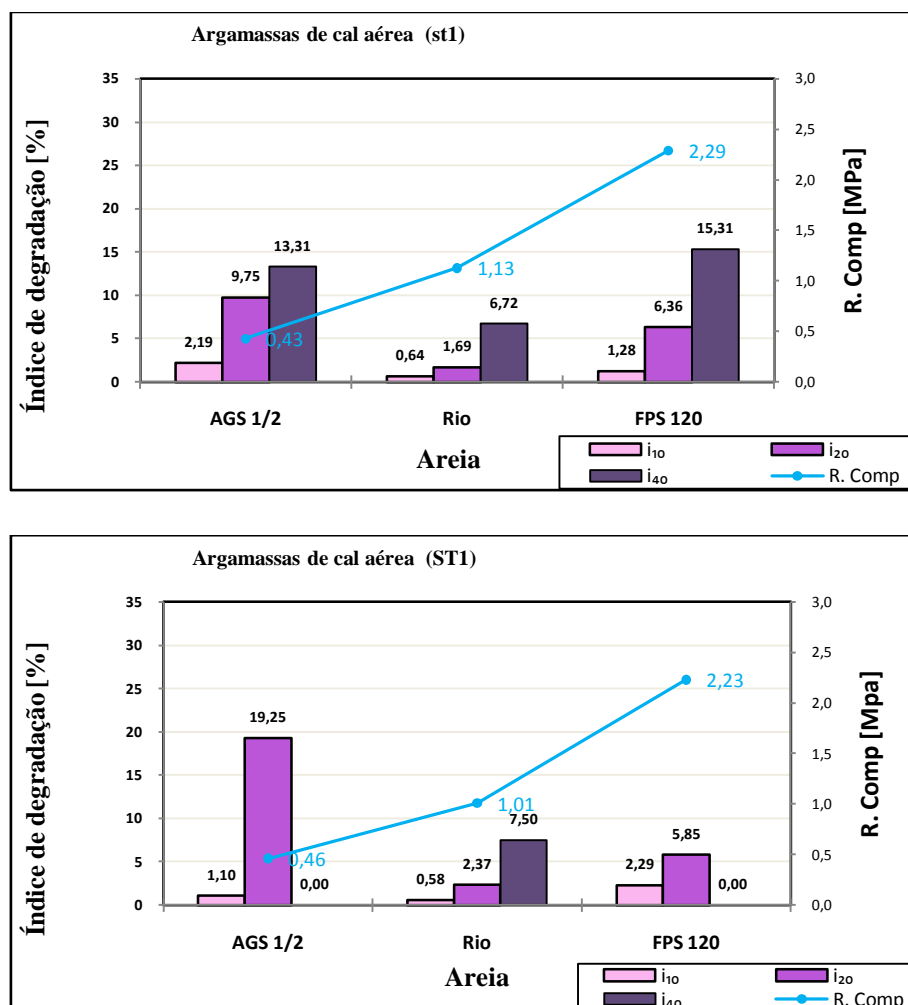


Figura 4.13 – Relação entre a resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

A relação do índice de degradação e a resistência à compressão é a mesma que em relação à tracção por flexão, não parecendo existir relação directa entre a resistência à compressão e a resistência aos ciclos gelo/degelo nestas argamassas.

4.2.2.2 Argamassas de cal hidráulica

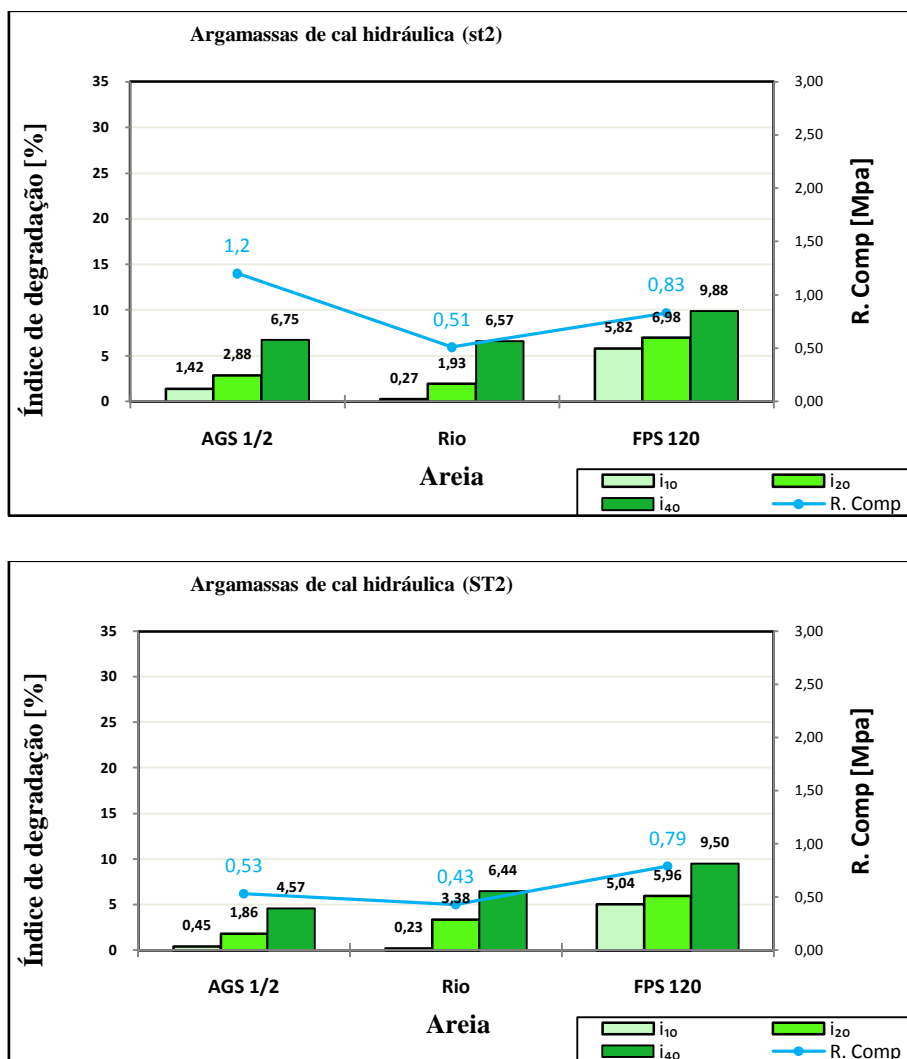


Figura 4.14 – Relação entre a Resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

A relação entre o índice de degradação e a resistência à compressão nas argamassas de cal hidráulica, como é visível na figura 4.14, é semelhante à verificada na flexão. A exceção é o valor de resistência à compressão na argamassa com areia de rio e maior quantidade de água, sendo que a ordem de grandeza da diferença é pequena.

4.2.2.3 Argamassas de cal aérea + cimento

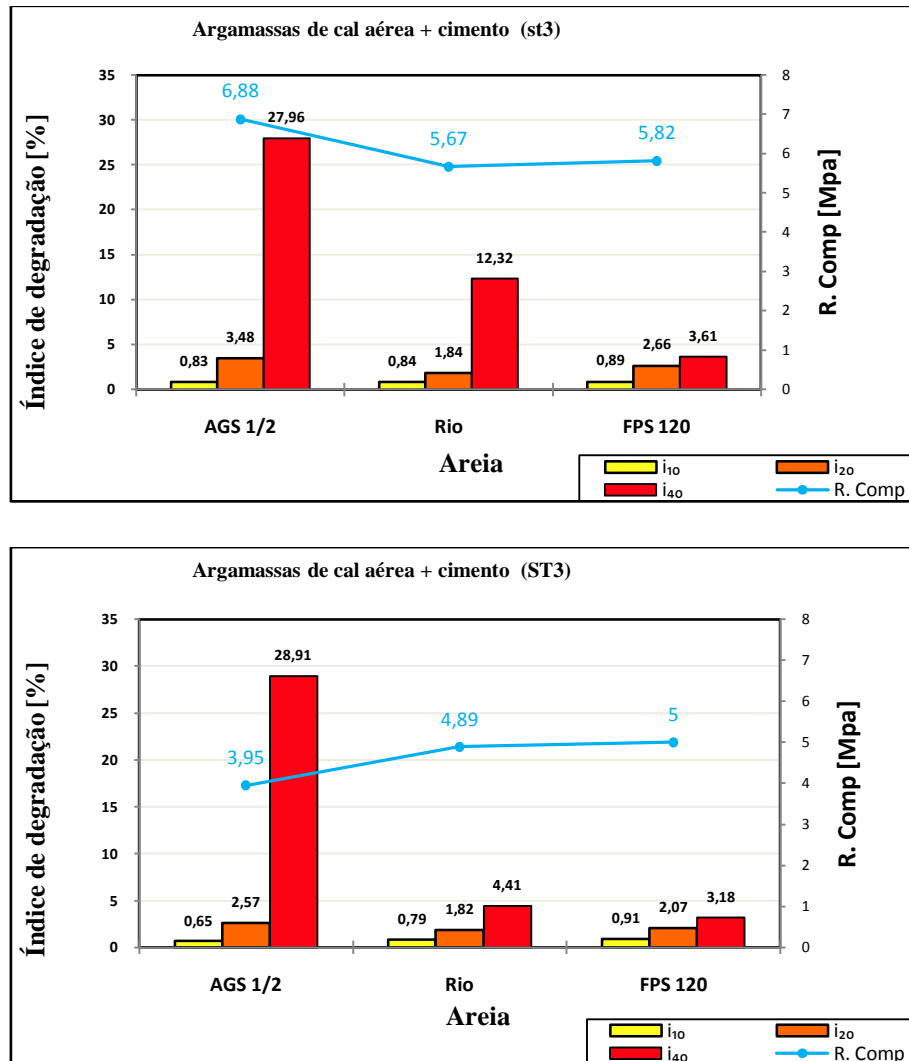


Figura 4.15 – Relação entre a resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

A figura 4.15 mostra que, a relação entre a resistência à compressão e o índice de degradação é semelhante à verificada para a resistência à tracção por flexão, ou seja, o índice diminui com o aumento da resistência à compressão. A argamassa com menor quantidade de água e areia AGS 1/2 é a excepção a este comportamento, sendo que a explicação desse valor (possível maior concentração de areia na zona de ensaio) encontra-se no subcapítulo 3.4.2.

4.2.2.4 Argamassas com introdutor de ar

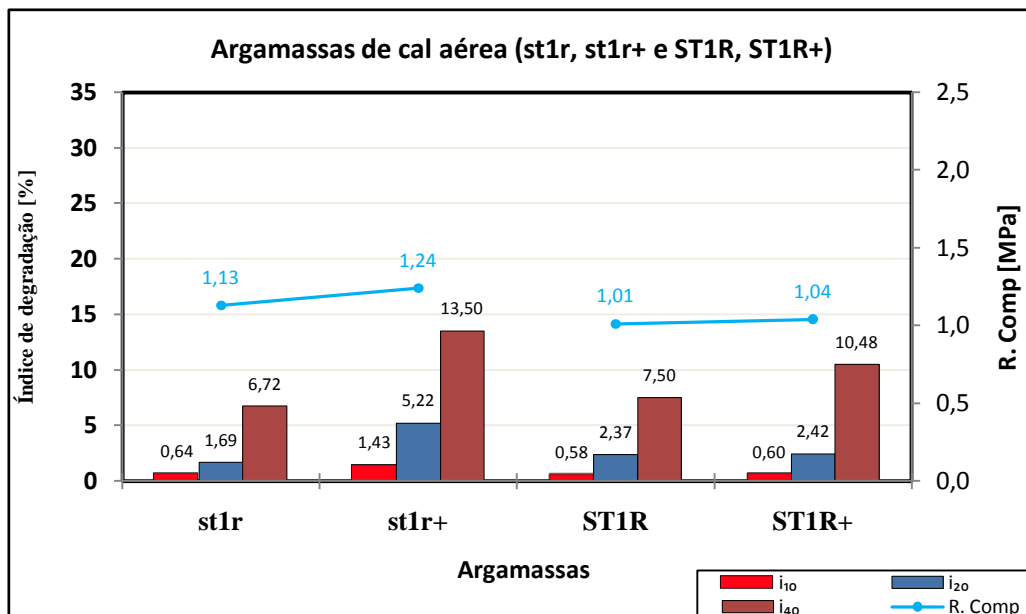


Figura 4.16 – Relação entre a resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea com e sem introdutor de ar. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

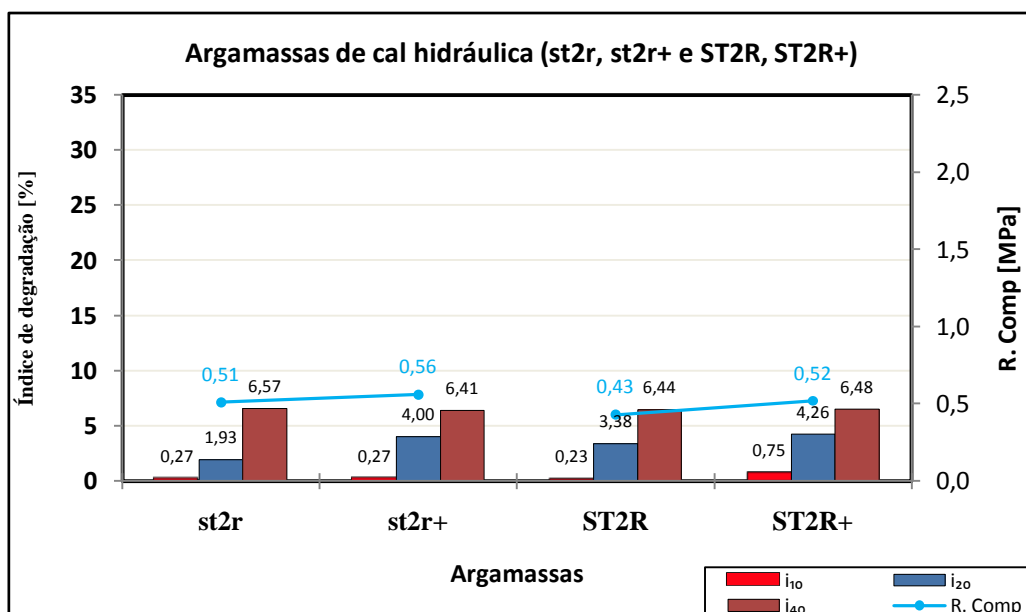


Figura 4.17 – Relação entre a resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal hidráulica com e sem introdutor de ar. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

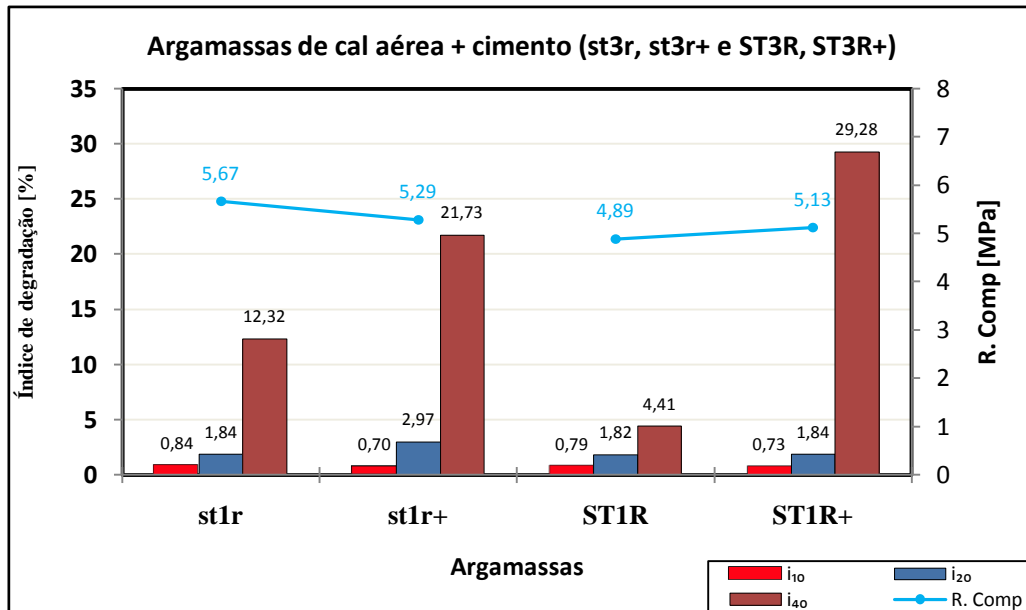


Figura 4.18 – Relação entre a resistência à compressão e o índice de degradação nas argamassas de cal aérea + cimento com e sem introdutor de ar. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo

As figuras 4.16, 4.17 e 4.18 revelam uma eventual tendência de subida da resistência à compressão e índice de degradação com o uso do introdutor de ar. Na argamassa de cal aérea + cimento com menor quantidade de água, o introdutor de ar denota um comportamento em relação à resistência à compressão diferente dos restantes não tendo sido encontrada explicação para este facto. As argamassas de cal hidráulica, apesar do aumento da resistência à compressão, revelam valores de índices de degradação constantes. É reforçada a estranheza demonstrada no subcapítulo 3.4.2, pois estes valores de resistência à compressão não eram esperados não só por não acompanharem os valores da resistência à tracção por flexão como pelo efeito que o introdutor de ar produziu (aumento desses valores).

5 Síntese global e validação das recomendações

Este capítulo tem o objectivo de interligar os resultados respeitantes às características das argamassas com a análise de resultados das suas propriedades. É efectuada uma análise com o objectivo não só da indicação das argamassas que revelam um melhor comportamento à acção de ciclos gelo/degelo, mas também, da diferença de comportamentos que as suas propriedades podem gerar. A análise é feita por argamassas com o mesmo tipo de ligante sem introdutor de ar. As argamassas com introdutor de ar possuem análise distinta.

As argamassas de cal aérea com areia AGS 1/2 e com areia FPS 120 apresentam um mau comportamento à acção dos ciclos gelo/degelo, sendo este agravado com o aumento de água de amassadura. As argamassas com areia AGS 1/2 têm mais um aspecto negativo, apresentam um maior coeficiente de absorção capilar, enquanto que as argamassas com areia FPS 120 apresentam não só valores mais baixos no coeficiente de absorção capilar mas são também, neste ligante, as que têm valores de índice de secagem mais elevados. As argamassas com areia de rio são as que melhor comportamento aos ciclos gelo/degelo apresentam, sendo que a diferença da quantidade de água na amassadura não altera os valores do índice de degradação. Estas argamassas apresentam valores de coeficiente de difusão do vapor de água semelhantes aos das argamassas com as restantes areias e índice de secagem e coeficiente de absorção capilar intermédios.

As argamassas com cal hidráulica têm um bom comportamento aos ciclos gelo/degelo; maior quantidade de água de amassadura, nestas argamassas, significa melhor comportamento aos 40 ciclos de ensaio. As argamassas com areia FPS 120 apresentam não só pior comportamento à acção dos ciclos gelo/degelo como maiores valores de absorção capilar e coeficiente de absorção capilar. Como aspecto favorável apresentam um maior coeficiente de difusão do vapor de água. As argamassas com areia AGS 1/2 são as que apresentam melhores resultados na resistência à acção dos ciclos gelo/degelo mas apresentam a desvantagem de serem, com este tipo de ligante, as que menor valor de índice de secagem apresentam. As argamassas com esta areia, apesar de

apresentarem o maior valor de coeficiente de absorção capilar, são as que menor quantidade de água absorvem por capilaridade como indica o valor de absorção capilar.

As argamassas de cal aérea + cimento com areia AGS 1/2 são as que apresentam pior comportamento à acção dos ciclos gelo degelo e os valores mais baixos de difusão do vapor de água. Apesar deste mau comportamento, apresentam não só um valor baixo do coeficiente de capilaridade, mas também o menor valor de quantidade total de água absorvida por capilaridade. As argamassas com areia de rio e menor quantidade de água apresentam mau comportamento à acção dos ciclos gelo/degelo tendo a agravante de possuir um menor coeficiente de difusão do vapor de água. A estas desvantagens, contrapõe-se a propriedade capilaridade, com um baixo coeficiente de absorção capilar. Com composição semelhante à anterior mas com maior quantidade de água, o bom comportamento à acção dos ciclos gelo/degelo faz-se acompanhar das vantagens de um maior valor de coeficiente de difusão do vapor de água e de um menor coeficiente de absorção capilar. As argamassas de cal aérea + cimento com areia FPS 120 são as que apresentam melhor comportamento à acção dos ciclos gelo/degelo, comportamento este largamente influenciado pelas grandes resistências mecânicas exibidas. São as argamassas que dentro deste tipo de ligante apresentam os maiores coeficientes de difusão do vapor de água. A desvantagem destas argamassas é a absorção de água por capilaridade, sendo não só são as que absorvem uma maior quantidade de água como as que a absorvem mais rapidamente com este tipo de ligante. A argamassa com menor quantidade de água, apesar de apresentar uma absorção menor (avaliada pelo valor assintótico), o seu coeficiente de absorção é maior em relação às constituídas com maior quantidade de água de amassadura.

O introdutor de ar piora a características de resistência ao gelo/degelo nas argamassas de cal aérea. Esta piora faz-se acompanhar de um menor índice de secagem e um maior coeficiente de absorção capilar. A maior quantidade de água de amassadura tem a única vantagem de aumentar o valor do coeficiente de difusão de vapor de água.

As argamassas de cal hidráulica apresentam uma grande homogeneidade comportamental a nível da resistência aos ciclos gelo/degelo com e sem introdutor de ar.

O uso do introdutor de ar nestas argamassas tem a desvantagem de fazer baixar o índice de secagem e, nas argamassas com menor quantidade de água de amassadura, baixar o coeficiente de difusão de vapor de água; contudo, apresenta as vantagens de fazer baixar o coeficiente de absorção capilar e ter uma menor absorção de água por capilaridade.

As argamassas de cal aérea + cimento com introdutor de ar, apesar de apresentarem um mau comportamento à acção dos ciclos gelo/degelo, possuem propriedades francamente mais favoráveis em relação às de constituição semelhante sem o produto. O introdutor de ar faz aumentar o coeficiente de difusão de vapor de água, diminuir o volume total de água absorvida por capilaridade, aumentar o índice de secagem e diminuir o coeficiente de absorção capilar. A maior quantidade de água de amassadura nas argamassas com introdutor de ar faz melhorar as características de secagem e difusão do vapor de água e piorar as características de absorção de água por capilaridade.

Em resumo, e na sequência do trabalho efectuado, considera-se que, do conjunto de composições analisadas, a que melhor parece cumprir os requisitos de resistência aos ciclos gelo/degelo, no contexto de outras propriedades satisfatórias, é a argamassa de cal aérea + cimento com areia de rio e maior quantidade de água.

Conclusões gerais e sugestões de trabalhos futuros

Conclusões gerais

O trabalho desenvolvido insere-se no domínio do comportamento de argamassas para reabilitação e conservação de edifícios antigos, mais especificamente o comportamento em climas frios.

Foi feita uma pesquisa de modo a adquirir competências que permitissem o conhecimento do tema e a sua abrangência e um melhor enquadramento do programa de investigação proposto. Foi realizado um conjunto de argamassas, em que a sua formulação englobou variações de areias de diferentes granulometrias, quantidades de água de amassadura, ligantes e o uso de um introdutor de ar. Foram estabelecidas tendências gerais e observadas discrepâncias em alguns valores de ensaio que são justificadas pela abordagem feita.

Os objectivos e as duas hipóteses inicialmente propostas servem de ponto de partida ao estabelecimento das conclusões gerais aqui apresentadas que permitem uma compreensão global das relações existentes entre componentes, características e propriedades das argamassas.

A primeira hipótese sugeriu que a variação do tipo de ligante gerava argamassas com resistências mecânicas de diferentes ordens de grandeza tendo implicações na resistência aos ciclos gelo/degelo. Esta hipótese veio a confirmar-se. As argamassas bastardas são, naturalmente, as que apresentam as resistências mecânicas superiores. As argamassas de cal aérea consideradas neste estudo apresentam resistências mecânicas superiores às de cal hidráulica, o que se deve ao traço mais forte em ligante. Existem duas tendências diferentes de comportamento das argamassas na relação entre as resistências mecânicas e a resistência aos ciclos gelo/degelo: (i) nas argamassas de cal aérea e de cal hidráulica o aumento das resistências mecânicas está genericamente associado a uma menor resistência aos ciclos gelo/degelo; (ii) nas argamassas de cal aérea + cimento verificou-se a tendência contrária. Em relação ao primeiro conjunto (cal aérea e cal hidráulica), deve referir-se que esta tendência, aparentemente contraditória, está relacionada com a granulometria das areias utilizadas. O tipo de estrutura porosa

resultante condiciona fortemente a capacidade das argamassas resistirem ao efeito dos ciclos gelo/degelo. Deste modo, em argamassas com este tipo de ligante, o agregado assume um papel preponderante, não se podendo estabelecer correlações directas entre resistências mecânicas e a resistência ao gelo/degelo.

A segunda hipótese considerou que a variação dos componentes criaria diferentes microestruturas nas argamassas o que, por sua vez, implicaria distintos comportamentos aos ciclos gelo/degelo. A granulometria das areias desempenha um papel determinante nas características microestruturais das argamassas. A uma diminuição da granulometria das areias corresponde um aumento da porosidade das argamassas. A quantidade de água na amassadura exibe tendência contrária, *i.e.*, o seu aumento corresponde a um aumento da porosidade (sendo que pequeno, para as diferenças de água introduzidas); o introdutor de ar tem o mesmo efeito de aumentar a porosidade (sensivelmente na mesma ordem de grandeza). Curiosamente a porosidade apresenta a mesma tendência geral que as resistências mecânicas no que diz respeito à sua relação com a resistência aos ciclos gelo/degelo. Esta situação indica que o aumento da porosidade (maioritariamente influenciado pela diminuição da granulometria da areia) é acompanhado pela redução da porometria, ou seja, existe uma maior quantidade de poros mas com menores dimensões, o que piora o comportamento das argamassas aos ciclos gelo/degelo. As argamassas de cal aérea + cimento têm tendência contrária na relação porometria/resistência aos ciclos gelo/degelo. Este comportamento indica que o efeito das resistências mecânicas superiores destas argamassas sobrepõe-se às características porométricas.

A acção do componente introdutor de ar não foi a esperada. O efeito de aumento de porosidade não foi acompanhado com a melhoria do comportamento das argamassas aos ciclos gelo/degelo. Em algumas das argamassas com introdutor de ar verificou-se ainda um aumento da resistência à compressão, o que não corresponde aos padrões expectáveis segundo a investigação publicada. Pode assim concluir-se que este adjuvante (comercializado para betões) não deve ser usado em argamassas com ligante aéreo nas condições ensaiadas.

Finalmente, no que se refere à influência da microestrutura no comportamento das argamassas, são tiradas algumas conclusões em relação às propriedades que, de algum modo, podem influenciar o seu comportamento aos ciclos gelo/degelo.

Em relação à absorção de água por capilaridade, deve ser distinguido o valor assintótico e o coeficiente de absorção capilar. O valor assintótico de absorção depende da porosidade aberta, quanto mais porosa a argamassa maior o valor assintótico. A provar este facto estão as argamassas com areia mais fina (FPS 120), nas quais à sua maior porosidade corresponde um maior valor assintótico de absorção. Em relação ao coeficiente de absorção capilar as argamassas com ligante hidráulico comportam-se de forma diferente das argamassas de cal aérea. Nas argamassas de cal aérea o coeficiente baixa de valores com a diminuição da granulometria da areia (aumento da porosidade) e o uso do introdutor de ar faz aumentar os seus valores. As argamassas com ligante hidráulico têm comportamento contrário. Os valores mais elevados de coeficiente de absorção capilar são exibidos pelas argamassas de cal aérea + cimento.

A diminuição da granulometria do agregado e consequente aumento de porosidade melhora as condições de secagem das argamassas de cal aérea e cal hidráulica. Nas argamassas de cal aérea + cimento os valores muito próximos não fazem vislumbrar nenhuma tendência deste género. O introdutor de ar melhora as condições de secagem das argamassas bastardas e piora o comportamento nas de cal aérea e cal hidráulica.

As argamassas de cal hidráulica apresentam os valores mais elevados de difusão do vapor de água, sendo em escala descendente seguidas pelas de cal aérea e as bastardas. As argamassas com ligante hidráulico apresentam a tendência de aumento do coeficiente de difusão do vapor de água com a diminuição da dimensão do agregado e as argamassas de cal hidráulica não apresentam tendência fazendo variar este factor. O introdutor de ar só produziu efeitos significativos nas argamassas de cal aérea + cimento, fazendo aumentar o valor de difusão.

Finalmente é abordado o módulo de elasticidade dinâmico. Este factor tem extrema importância no comportamento de argamassas que se destinam à conservação e à reabilitação de edifícios antigos pois, para a maioria destes trabalhos, são necessárias argamassas com pouca rigidez de modo a verificarem uma boa compatibilidade com o suporte. Como esperado, as argamassas de cal aérea são as mais deformáveis. O uso do introdutor de ar faz também aumentar a deformabilidade das argamassas estudadas.

Os objectivos inicialmente estabelecidos foram considerados cumpridos através das conclusões acima descritas. O desenvolvimento deste trabalho experimental alargou conhecimentos neste tema e pensa-se constituir uma base para trabalhos futuros.

Sugestões de trabalhos futuros

O trabalho desenvolvido experimentalmente, tal como referido na introdução, faz variar apenas alguns aspectos dos quais depende o comportamento das argamassas, mais precisamente aos ciclos gelo/degelo. Seria de grande importância as argamassas serem submetidas a outros ensaios e serem efectuados alguns melhoramentos em ensaios realizados. Seguidamente, são resumidos alguns aspectos que merecem interesse.

Primeiramente são referidas as condições de ensaios realizados que poderão ser melhoradas. Em relação ao ensaio de secagem das argamassas, deve ser adoptado um sistema de ensaio com maior controlo das condições ambientais a que as argamassas estão sujeitas. No que diz respeito ao ensaio de absorção de água por capilaridade sugere-se um esquema de ensaio mais avançado tecnologicamente em que se verifique uma constância no filme de água de modo à obtenção de resultados ser mais rigorosa, principalmente durante a noite.

Em relação ao introdutor de ar poderá ser feita uma investigação de modo a comparar os existentes no mercado com uma maior variação dos componentes das argamassas de modo a perceber as limitações ao nível de ligantes alvo que estes produtos apresentam. É de grande interesse ainda comparar os valores dos variados ensaios das argamassas fazendo variar o factor compactação de modo a perceber até que ponto esta operação tem influência na diminuição da porosidade e redução da acção do introdutor, como sugerido ao longo do trabalho.

O ensaio de porosidade deverá ser, na maioria das vezes, acompanhado pelo ensaio de porometria. Apesar do conhecimento generalizado acerca do comportamento da porometria em relação principalmente à granulometria do agregado (maior agregado – maior porometria), era de grande interesse o conhecimento da dimensão dos poros de modo a verificar-se se o introdutor de ar tinha o efeito esperado (provocar poros maiores) em argamassas com ligantes aéreos.

Em relação ao comportamento de argamassas em climas frios sugere-se, em complemento, um outro tipo de ensaio, em que as argamassas são aplicadas em alvenaria (por exemplo uma parede). Esta situação poderia dar importantes informações quanto à relação argamassa/suporte, que se julga condicionar também a capacidade de resistência aos ciclos gelo/degelo.

Bibliografia

- [1] AHMED, Shaikh Faiz Uddin; MIHASHI, Hirozo - *A review on durability properties of strain hardening fibre reinforced cementitious composites (SHFRCC)*. Cement and Concrete Composites 29 (2007) 365-376. Elsevier, 2007.
- [2] ALLEN, Geoffrey *et al* - *Hydraulic Lime Mortar*. 1ª edição. Dorset: Donhead 2003. ISBN 1 873394 64 0.
- [3] ARANDIGOYEN, M. *et al* - *Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity*. Applied Surface Science 252 (2005) pp. 1449-1459. Elsevier, 2005.
- [4] ARANDIGOYEN, M.; ALVAREZ, J. I. - *Blended pastes of cement and lime: Pore structure and capillary porosity*. Applied Surface Science 252 (2006) pp. 8077-8085. Elsevier, 2005.
- [5] ARANDIGOYEN, M.; ALVAREZ, J. I. - *Pore structure and Mechanical properties of cement-lime mortars*. Cement and Concrete Research 37 (2007) pp. 767-775. Elsevier, 2007.
- [6] BASHEER, L.; CLELAND, D. J. - *Freeze-thaw resistance of concretes treated with pore liners*. Construction and Building Materials 20 (2006) pp. 990-998. Elsevier, 2005.
- [7] CAI, H.; LIU, X. - *Freeze-thaw durability of concrete: Ice formation process in pores*. Cement and Concrete Research 28 (1998) pp. 1281-1287. Elsevier, 1998.
- [8] CAO, Jingyao; CHUNG, D. D. L. - *Damage evolution during freeze-thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement*. Cement and Concrete Research 32 (2002) pp. 1657-1661. Elsevier, 2002.
- [9] ČERNÝ, Robert *et al* - *The effects of thermal load and frost cycles on the water transport in two high-performance concretes*. Cement and Concrete Research 31 (2001) pp. 1129-1140. Elsevier, 2001.
- [10] CHAROLA, A. E. - *Water Absorption and Drying Behaviour. Laboratory Notes*. HSPV-656 Advanced Architectural Conservation.
- [11] CHATTERJI, S. - *Aspects of the freezing process in a porous material - water system Part 1 Freezing and the properties of water and ice*. Cement and Concrete Research 29 (1999) pp. 627-630. Elsevier, 1999.
- [12] CHATTERJI, S. - *Aspects of the freezing process in a porous material - water system Part 2 Freezing and the properties of frozen porous materials*. Cement and Concrete Research 29 (1999) pp. 781-784. Elsevier, 1999.

- [13] CHATTERJI, S. - *Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents*. Cement and Concrete Research 25 (2003) pp. 759-765. Elsevier, 2002.
- [14] CHO, Taejun - *Prediction of cyclic freeze-thaw damage in concrete structures based on response surface method*. Construction and Building Materials 21 (2007) pp. 2031-2040. Elsevier, 2007.
- [15] COUTINHO, A. S. - *Fabrico e propriedades do betão*. Volumes I, II e III. 3ª edição. Lisboa: LNEC 1997. ISBN 972-49-0326-5.
- [16] COUTINHO, J. S. - *Materiais de construção 1 - Agregados para argamassas e betões*. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 1999.
- [17] COUTINHO, J. S. - *Materiais de construção 2 - 1ª parte - Ligantes e Caldas*. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2006.
- [18] CULTRONE, G. *et al* - *Durability of masonry systems: A laboratory study*. Construction and Building Materials 21 (2007) pp. 40-51. Elsevier, 2005.
- [19] CULTRONE, G. *et al* - *Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes*. Cement and Concrete Research 35 (2005) pp. 2278-2289. Elsevier, 2005.
- [20] CUNHA, E. R. *et al* - *Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars*. Cement and Concrete Research 37 (2007) pp. 924-932. Elsevier, 2007.
- [21] DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL (DEC) / UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA (UNL) - *Análise de argamassas. Determinação da consistência*. Fichas de Ensaio: Fe 25. Caparica: FCT/UNL, 1998.
- [22] DEC/UNL - *Análise de argamassas. Determinação da resistência à flexão e compressão*. Fichas de ensaio: Fe 27. Caparica: FCT/UNL, 1999.
- [23] DEC/UNL - *Análise de argamassas. Preparação de provetes*. Fichas de Ensaio: Fe 19. Caparica: FCT/UNL, 1996.
- [24] DEC/UNL - *Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade*. Fichas de Ensaio: Fe 15. Caparica: FCT/UNL, 1996.
- [25] DEC/UNL - *Pedras naturais e artificiais. Determinação da absorção de água por capilaridade*. Fichas de Ensaio: Fe 06. Caparica: FCT/UNL, 1999.
- [26] DEC/UNL - *Pedras naturais e artificiais. Determinação da massas volúmica*. Fichas de ensaio: Fe 01. Caparica: FCT/UNL, 1996.

- [27] DEC/UNL - *Pedras naturais e artificiais. Determinação da permeabilidade ao vapor de água*. Fichas de Ensaio: Fe 05. Caparica: FCT/UNL, 1999.
- [28] DEC/UNL - *Pédras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta*. Fichas de Ensaio: Fe 02. Caparica: FCT/UNL, 1996.
- [29] DEC/UNL - *Pedras naturais e artificiais. Determinação do índice de secagem*. Fichas de Ensaio: Fe 07. Caparica: FCT/UNL, 1996.
- [30] DEC/UNL - *Pedras Naturais e artificiais. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico*. Fichas de Ensaio: Fe 08. Caparica: FCT/UNL, 1996.
- [31] DHIR, R. K. *et al* - *Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction*. Materials and Structures 40 (2007) pp. 459-473. RILEM, 2007.
- [32] EL-TURKI, A. *et al* - *The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime*. Cement and Concrete Research 37 (2007) pp. 1233-1240. Elsevier, 2007.
- [33] FARIA RODRIGUES, Paulina - *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas -contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento de Engenharia Civil na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2004.
- [34] FARIA, P.; HENRIQUES, F.; RATO, V. M. - *Comparative evaluation of aerial lime mortars for architectural conservation*. Journal of Cultural Heritage. Vol. 9, No.3 pp. 338-346. Elsevier, 2008.
- [35] FERREIRA, V. M. *et al* - *Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars*. Construction and Building Materials 23 (2009) pp. 1147-1153. Elsevier, 2008.
- [36] GEIKER, Mette R.; LAUGESSEN, Peter - *On the effect of laboratory conditioning and freeze/thaw exposure on moisture profiles in HPC*. Cement and Concrete Research (2001) pp. 1831-1836. Elsevier, 2001.
- [37] GREEN, K. M. *et al* - *The effects of lime and admixtures on the water-retaining properties of cement mortars*. Cement and Concrete Research 29 (1999) pp. 1743-1747. Elsevier, 1999.
- [38] GUERREIRO, Carlos *et al* - *Análise comparativa de argamassas de cal aérea, medianamente hidráulicas e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos*. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2007.
- [39] HALL, Kevin - *Evidence for freeze-thaw events and their implications for rock weathering in Northern Canada*. Earth Surf. Process. Landforms 29 (2004) pp. 43-57. John Wiley and Sons, 2003.

- [40] HANSEN, Eric F. *et al* - *Lime Putties and Mortars*. Studies in conservation 53 (2008) pp. 9-23. IIC, 2008.
- [41] HENRIQUES, F.; CHAROLA, A. E.; RATO, V. M.; FARIA, P. - *Morteros de reposición en la conservación del patrimonio arquitectónico*. Parte I. Revista Habitat nº 53 pp. 38-48. Buenos Aires: Janeiro de 2008.
- [42] HENRIQUES, F.; CHAROLA, A. E.; RATO, V. M.; FARIA, P. - *Morteros de reposición en la conservación del patrimonio arquitectónico*. Parte II. Revista Habitat nº 54. Buenos Aires: Janeiro de 2008.
- [43] HENRIQUES, F.; RATO, V. M.; CHAROLA, A. E. - *The Influence of Grain size Distribution on the performance of mortars*. Comunicação ao 10th International Congress on Deterioration and conservation of stone, STONE 2004. Estocolmo: International Council on Monuments and Sites (ICOMOS), Julho de 2004.
- [44] INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) - *Definições, composição, especificações e critérios de conformidade de cimentos*. NP 2064 : 1991.
- [45] IPQ - *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. NP EN 1097-3:2002.
- [46] IPQ - *Methods of test for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. EN 1015-11:1999.
- [47] IPQ - *Methods of test for mortar for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. EN 1015-2 : 1998.
- [48] IPQ - *Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. EN 1015-3:1999 (Ed. 1).
- [49] JO, Byung-wan *et al* - *Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA)*. Cement and Concrete Composites 29 (2007) pp. 128-135. Elsevier, 2006.
- [50] KONOW, Thorborg von - *Repair Mortars for Historic Masonry*. RILEM Workshop. Delft University of Technology, 26-28 January 2005.
- [51] LAFHAJ, Zoubair *et al* - *Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content*. Cement and Concrete Research 36 (2006) pp. 625-633. Elsevier, 2005.
- [52] LANAS, J. *et al* - *Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions*. Cement and Concrete Research 36 (2006) pp. 961-970. Elsevier, 2005.
- [53] LANAS, J.; ALVAREZ, J.I. - *Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior*. Cement and Concrete Research 33 (2003) pp. 1867-1876. Elsevier, 2003

- [54] LANAS, J. *et al* - *Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*. Cement and Concrete Research 34 (2004) pp. 2191-2201. Elsevier, 2004.
- [55] LAWRENCE, R. M. *et al* - *Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars*. Cement and Concrete Research 37 (2007) pp. 1059-1069. Elsevier, 2007.
- [56] LIGANTES Capítulo III, <http://issuu.com/filo/docs/livro/1>, 25 de Março de 2009
- [57] MALVA, M. S. - *Argamassas de reboco para edifícios antigos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil apresentada no Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008.
- [58] MARGALHA, Maria Goreti *et al* - *Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, 2007.
- [59] MAURENBRECHER, A. H. P. *et al* - *Preliminary evaluation of the freeze-thaw resistance of hydraulic lime mortars*. Workshop on repair mortars for historic masonry (26-28 de Janeiro 2005). RILEM, 2005.
- [60] MOSQUERA, M. J. *et al* - *Addition of cement to lime based mortars: Effect on pore structure and vapour transport*. Cement and Concrete Research 36 (2006) pp. 1635-1642. Elsevier, 2005.
- [61] MOSQUERA, M. J. *et al* - *Pore structure in mortars applied on restoration - Effect on properties relevant to decay of granite buildings*. Cement and Concrete Research 32 (2002) pp. 1883-1888. Elsevier, 2002.
- [62] MUN, K. J. *et al* - *The effect of slaked lime, anhydrous gypsum and limestone powder on properties of blast furnace slag cement mortar and concrete*. Construction and Building Materials 21 (2007) pp. 1576-1582. Elsevier, 2006.
- [63] PALOMO, A. *et al* - *Historic mortars: Characterization and durability. New Tendencies for Research*.
- [64] PEREIRA, T. A. R. - *Optimização das características de humedecimento e secagem de argamassas*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2008.
- [65] PINTO, A. P. F. - *Conservação de pedras carbonatadas: Estudo e selecção de tratamentos*. IST. Lisboa, 2002.
- [66] POPPE, A. M.; DE SCHUTTER, G. - *Quantification of the water demand of sand in mortar*. Construction and Building Materials 18 (2004) pp. 517-521. Elsevier, 2004.

- [67] PUERTAS, F. *et al* - *Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres*. Cement and Concrete Research 33 (2003) pp. 2031-2036. Elsevier, 2003.
- [68] RATO, V. N. M. - *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento de Engenharia Civil apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2006.
- [69] REDDY, B. V.; GUPTA, Ajay - *Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry*. Construction and Building Materials 22 (2008) pp. 1614-1623. Elsevier, 2007.
- [70] REIS, J. M. L.; FERREIRA, A. J. M. - *Freeze-thaw and thermal degradation influence on the fracture properties of carbon and glass fiber reinforced polymer concrete*. Construction and Building Materials 20 (2006) pp. 888-892. Elsevier, 2005.
- [71] RIBEIRO, M. C. S. *et al* - *Flexural performance of polyester and epoxy polymer mortars under severe thermal conditions*. Cement and Concrete Composites 26 (2004) pp. 803-809. Elsevier, 2003.
- [72] SEABRA, M. P. *et al* - *Rheological behaviour of hydraulic lime-based mortars*. Journal of the European Ceramic Society 27 (2007) pp. 1735-1741. Elsevier, 2006.
- [73] SÉBAÏBI, Y. *et al* - *The effect of various slaked limes on the microstructure of a lime-cement-sand mortar*. Cement and Concrete Research 36 (2006) pp. 971-978. Elsevier, 2006.
- [74] SMAOUI, N. *et al* - *Effects of alkali addiction on the mechanical properties and durability of concrete*. Cement and Concrete Research 35 (2005) pp. 203-212. Elsevier, 2004.
- [75] STEFANIDOU, M.; PAPAYIANNI, I. - *The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars*. Cement and Concrete Composites 27 (2005) pp. 914-919. Elsevier, 2005.
- [76] TATE, Michael J. *et al* - *Effect of air entrainment on freeze-thaw durability of type S Portland cement-lime masonry mortars*. 9th Canadian Masonry Symposium. Staffordshire.
- [77] TOOMEY, B.; PAVÍA, S. - *Influence of the aggregate quality on the physical properties of natural feebly-hydraulic lime mortars*. Materials and Structures 41 (2008) pp. 559-569. RILEM, 2007.
- [78] VAN BALEN, K. - *Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature*. Cement and Concrete Research 35 (2005) pp. 647-657. Elsevier, 2004.
- [79] WIKIPÉDIA - http://pt.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1gina_principal.

- [80] WINNEFELD, FRANK; BÖTTGER, K. G. - *How clayey fines in aggregates influence the properties of lime mortars*. Materials and Structures 39 (2006) pp. 433-443. RILEM, 2006.
- [81] YANG, Z. *et al* - *Water Transport in Concrete Damaged by Tensile Loading and Freeze-Thaw Cycling*. Journal of materials in Civil Engineering May/June (2006) pp. 424-434. ASCE, 2006.
- [82] YAZICI, Halit - *The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials 22 (2008) pp. 456-462. Elsevier, 2007.

ANEXO 1 – Ficha técnica do introdutor de ar

Sika-AER® 5

Introdutor de ar

Descrição do produto

Sika-AER® 5 é um adjuvante introdutor de ar para betão de acordo com a norma EN 934-2:T5.
Sika-AER® 5 permite aumentar a quantidade de ar ocluído no betão, sob a forma de bolhas finas muito estáveis e uniformemente repartidas no betão. Devido às suas características (dimensão das bolhas de ar, estabilidade no tempo do ar ocluído, distribuição homogénea) o Sika-AER® 5 permite obter betões endurecidos com uma maior resistência às acções do gelo-degelo.

Utilizações

Betão submetido à acção gelo-degelo:

- Obras na montanha.
- Obras de arte.
- Estradas em betão.
- Barragens.

Betão com baixo teor de elementos finos:

Quando há falta de finos, a betonagem é difícil e nestes casos, a utilização do Sika-AER® 5, que actua como corrector granulométrico, torna o betão mais trabalhável e mais fácil de betonar, devido ao efeito lubrificante de "rolamento de esferas" das bolhas de ar.

Betonagem em moldes deslizantes:

O adjuvante Sika-AER® 5 aumenta a tixotropia do betão e permite realizar a betonagem em contínuo: calhas, valetas, etc.

Características / Vantagens

As bolhas de ar, de diâmetro inferior ao dos grãos de cimento e da areia mais fina, actuam como finos deformáveis e melhoram as propriedades reológicas do betão fresco:

- Aumentando a trabalhabilidade do betão.
- Conferindo um melhor aspecto ao betão após a desmoldagem.
- Limita o efeito da capilaridade ou sucção capilar no betão endurecido, bloqueando a penetração dos líquidos ao nível da bolha de ar. A diminuição da capilaridade aumenta a durabilidade do betão submetido aos ciclos de gelo-degelo.

Certificados / Boletins de ensaio

Conforme as especificações da norma EN 934-2.

Dados do produto

Aspecto / Cor

Líquido castanho.

Fornecimento

25 e 200 kg.

Armazenagem e conservação

O produto deve estar armazenado em boas condições, nas embalagens de origem bem fechadas.
Conserva-se 6 meses a partir da data de fabrico.



Dados técnicos

Base química Compostos tensioactivos.

Massa volúmica
(23 ± 2 °C) 1,03 ± 0,02 kg/dm³.

pH (23 ± 2 °C) 11,0 ± 1,0.

Teor de sólidos 8,5 ± 0,8%.

Teor em iões cloreto < 0,1%.

Temperatura de cristalização - 1 °C.

Informação sobre o sistema

Pormenores de aplicação

Consumo / Dosagem Gama de utilização: 0,1% a 0,7% litro para 100 kg de cimento, segundo a quantidade de ar introduzido desejada.
A dosagem normal de Sika-AER[®] 5 é de 0,15% sobre o peso do cimento.
A quantidade de ar introduzido é função da dosagem do Sika-AER[®] 5, mas depende também da composição do betão (natureza e quantidade de finos), da sua plasticidade, do tempo de amassadura e da limpeza dos agregados, o que impõe um controlo diário em estaleiro da regularidade da percentagem de ar ocluído.

Instruções de aplicação

Mistura Introduzir Sika-AER[®] 5 na água de amassadura antes de esta ser despejada na betoneira. Misturar o betão pelo menos 90 segundos e manter constante o tempo de mistura para sucessivas amassaduras.
Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados, em seco (redução de eficácia).

Aplicação Sika-AER[®] 5 permite o fabrico de betão de qualidade, consequentemente devem ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a colocação e a cura do betão.

Limpeza de ferramentas Com água.

Importante Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem óptima do adjuvante e sempre que se altere a composição do betão.
Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, deve verificar-se que o produto não ficou alterado.
Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.

Nota Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Ensaios realizados noutras condições para determinação das mesmas características podem dar resultados diferentes devido a circunstâncias que estão fora do nosso controlo.

Risco e segurança

Medidas de segurança Mercadoria não perigosa para transporte.
Este produto não está classificado de acordo com a legislação da UE.
Para mais informações consultar a Ficha de Dados de Segurança do produto e o respectivo rótulo.



"O produto está seguro na Cª Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nº CH00003018LI05A), a título de responsabilidade civil do fabricante".

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedida.

Sika Portugal, SA
R. de Santarém, 113 Tel. +351 22 377 69 00
4400-292 V. N. Gaia Fax +351 22 370 20 12
Portugal www.sika.pt



Implementado na fábrica de Ovar

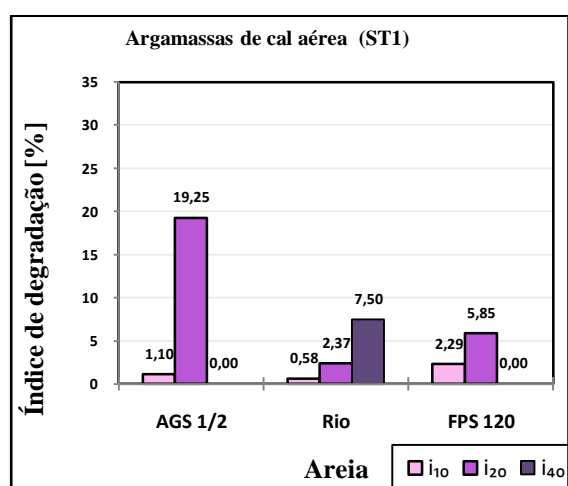
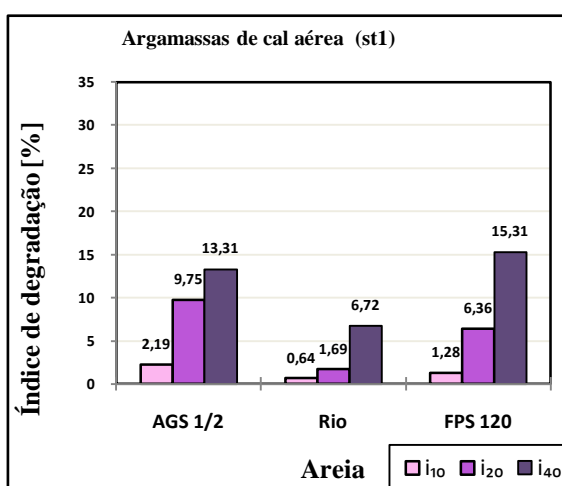
ANEXO 2 – Quadros e gráficos dos índices de degradação

Anexo 2 – Quadros e gráficos dos índices de degradação

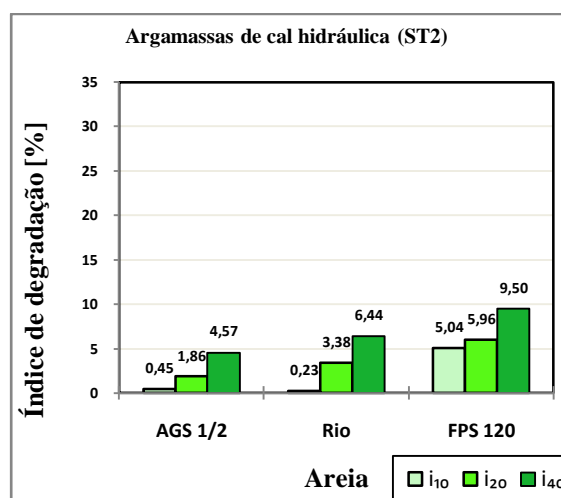
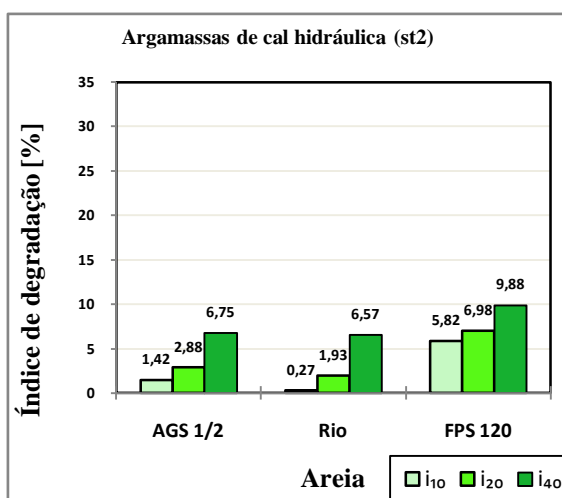
O anexo 2 contém os quadros e gráficos dos coeficientes comparativos de degradação e respectivos gráficos correspondentes aos 10, 20 e 40 ciclos aos quais a análise dos ciclos gelo/degelo no subcapítulo 3.8 faz referência.

Quadro A2.1 - coeficientes comparativos de degradação aos 10, 20 e 40 ciclos gelo/degelo.

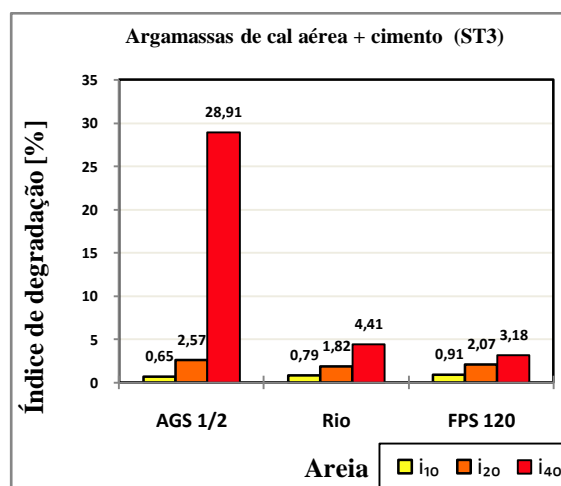
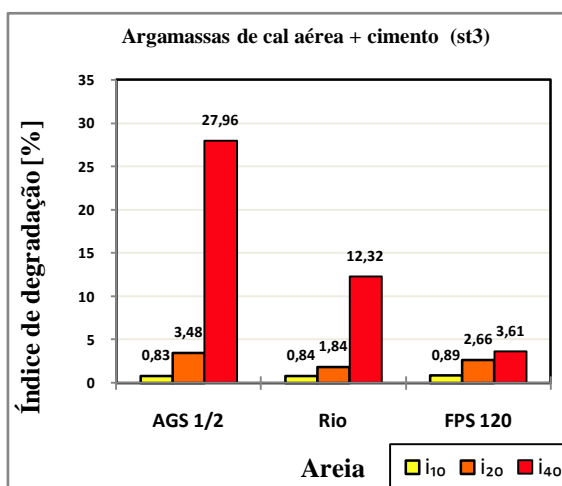
Argamassa	i_{10}	i_{20}	i_{40}	Argamassa	i_{10}	i_{20}	i_{40}
st1a	$2,194 \pm 0,271$	$9,75 \pm 1,121$	$13,307 \pm 0,982$	ST1A	$1,095 \pm 0,102$	$19,252 \pm 7,513$	-
st1r	$0,637 \pm 0,080$	$1,686 \pm 0,438$	$6,718 \pm 1,319$	ST1R	$0,584 \pm 0,043$	$2,375 \pm 0,054$	$7,502 \pm 2,569$
st1f	$1,283 \pm 0,623$	$6,361 \pm 1,530$	$15,307 \pm 3,409$	ST1F	$2,286 \pm 0,650$	$5,85 \pm 1,340$	-
st2a	$1,420 \pm 0,093$	$2,880 \pm 0,471$	$6,752 \pm 1,430$	ST2A	$0,446 \pm 0,032$	$1,856 \pm 0,047$	$4,573 \pm 1,340$
st2r	$0,273 \pm 0,056$	$1,926 \pm 2,485$	$6,572 \pm 2,450$	ST2R	$0,234 \pm 0,012$	$3,376 \pm 0,621$	$6,444 \pm 2,101$
st2f	$5,825 \pm 1,125$	$6,983 \pm 2,321$	$9,881 \pm 3,451$	ST2F	$5,044 \pm 0,403$	$5,956 \pm 0,341$	$9,499 \pm 3,198$
st3a	$0,831 \pm 0,190$	$3,477 \pm 0,856$	$27,959 \pm 5,306$	ST3A	$0,651 \pm 0,0734$	$2,570 \pm 0,741$	$28,911 \pm 7,481$
st3r	$0,841 \pm 0,217$	$1,838 \pm 0,412$	$12,320 \pm 3,451$	ST3R	$0,787 \pm 0,341$	$1,824 \pm 0,049$	$4,413 \pm 1,175$
st3f	$0,890 \pm 0,186$	$2,664 \pm 0,751$	$3,612 \pm 0,931$	ST3F	$0,911 \pm 0,0871$	$2,075 \pm 0,671$	$3,177 \pm 0,831$
st1r+	$1,426 \pm 0,467$	$5,218 \pm 1,234$	$13,504 \pm 2,546$	ST1R+	$0,599 \pm 0,082$	$2,416 \pm 0,561$	$10,478 \pm 4,265$
st2r+	$0,267 \pm 0,034$	$3,998 \pm 0,983$	$6,413 \pm 1,873$	ST2R+	$0,753 \pm 0,045$	$4,255 \pm 0,162$	$6,476 \pm 1,387$
st3r+	$0,702 \pm 0,128$	$2,971 \pm 0,672$	$21,73 \pm 8,451$	ST3R+	$0,729 \pm 0,0981$	$1,838 \pm 0,098$	$29,278 \pm 4,210$



Coeficientes comparativos de degradação das argamassas de cal aérea. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo



Coefficientes comparativos de degradação das argamassas de cal hidráulica. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo



Coefficientes comparativos de degradação das argamassas de cal aérea + cimento. i_{10} - índice de degradação decorridos 10 ciclos gelo/degelo; i_{20} - índice de degradação decorridos 20 ciclos gelo/degelo; i_{40} - índice de degradação decorridos 40 ciclos gelo/degelo